

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MADEIRA ANTIGA DE CARVALHO PROVENIENTE DE INCÊNDIO

SANDRA CLARA DA SILVA LEAL

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Professor Doutor José Manuel Marques Amorim de Araújo Faria

JUNHO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais e Irmãos

“Leia, Ouça, Veja, mas sobretudo Pense”

Agostinho da Silva

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Amorim Faria, meu orientador, muito obrigada pela paciência, pelos conselhos, pelas conversas, pela motivação e acima de tudo pelos conhecimentos que me transmitiu e que me ajudaram na concretização desta dissertação.

Ao Professor António Arêde pelo contributo na realização dos ensaios à flexão no Laboratório de Engenharia Estrutural e Sísmica da FEUP e aos seus funcionários, Sr. Valdemar e André Martins, pela ajuda e amabilidade com que sempre me trataram.

Aos meus amigos pela amizade e partilha. Um agradecimento especial para aqueles que comigo dividem o dia-a-dia pelo companheirismo com que me presenteiam.

E por último, os mais importantes, à minha família. Pelas vezes em que seguraram a minha mão e me ajudaram a seguir em frente. E por criarem as condições para que a conclusão deste curso fosse possível.

Aos meus irmãos Vítor, Célia, Margarida e Jorge por acreditarem em mim e pela compreensão. Aos meus cunhados/as, Alexandre, Toni, Ana e Filipa pelo apoio. E ainda aos meus sobrinhos, Simão, Luísa e Pedro por me fazerem sorrir e encherem o olhar.

Aos meus pais, Joaquim e Emília, um especial agradecimento por serem os pais que são, pelo exemplo de vida que me transmitem e pelos princípios com que me educam. O melhor presente que pude receber é pertencer à vossa família e ser parte de vós.

RESUMO

A combustibilidade da madeira e a insegurança diante de potenciais riscos relacionados com incêndio, são consideradas restrições para a construção de edifícios com sistemas estruturais em madeira. O estudo da influência da degradação térmica e da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira poderá contribuir para um melhor conhecimento sobre o comportamento termodinâmico das estruturas de madeira provenientes de incêndio, para o aproveitamento dessas madeiras em obras de reabilitação e também para a eliminação do preconceito relativo ao uso da madeira na construção civil.

Em termos estruturais, a madeira só deve ser utilizada quando forem conhecidas as suas características e propriedades que influenciam o seu comportamento físico e mecânico. Este aspecto toma maior relevância quando a madeira em questão é proveniente de elementos estruturais que tenham sofrido incêndio. O controlo de qualidade neste tipo de madeiras é impreterível e pretende proporcionar garantias ao limitar o efeito negativo provocado pela variabilidade das propriedades mecânicas.

Esta dissertação surgiu na continuidade da dissertação realizada por Samuel Pereira [31], concluída na FEUP em 2009, com o objectivo de concluir o tratamento estatístico sobre o sub-lote das amostras “Aprovadas” e proceder a uma nova campanha experimental de forma a validar a proposta de classificação visual para madeira antiga *in situ* pelo método “Amorim Faria”, utilizando madeira de carvalho proveniente de incêndio.

Para tal, aplicaram-se os critérios definidos no método a provetes retirados de elementos estruturais antigos de madeira de carvalho proveniente de incêndio, tendo sido removida a parte carbonizada previamente.

A componente experimental constituiu-se como uma peça essencial no desenvolvimento deste trabalho. As cinquenta amostras foram submetidas a uma intensa inspecção visual, aplicando as formas de medição de defeitos e os respectivos limites apresentados no método, com a finalidade de atribuir uma das duas classes sugeridas: *Aprovada* ou *Rejeitada*.

Realizou-se sobre as cinquenta amostras um ensaio mecânico à flexão, com o objectivo de se determinar valores para as seguintes propriedades mecânicas, resistência à flexão e módulo de elasticidade em flexão, de modo a se confrontar os resultados obtidos com os considerados na proposta citada e para se compararem com os resultados obtidos na campanha anterior.

Com este trabalho, nomeadamente com o ensaio mecânico, conseguiu-se perceber a madeira como elemento estrutural, interpretando o seu comportamento face às solicitações em causa. Por outro lado, face aos resultados encontrados não foi possível validar a proposta de classificação pelo método “Amorim Faria”, estes resultados serviram ainda para entender de que forma se poderá melhorar o método de classificação de madeira antiga.

PALAVRAS-CHAVE: degradação térmica, propriedades mecânicas, ensaio à flexão, classificação visual, método “Amorim Faria”

ABSTRACT

The combustibility of wood and insecurity about the potential risks associated with fire restrictions are considered for the construction of buildings with structural systems in wood. The study of the thermal degradation and temperature on the mechanical properties of wood can contribute to a better understanding of the thermodynamic behaviour of timber structures from fire, to the use of these woods in rehabilitation and also for the elimination of prejudice on the use of wood in construction.

In structural terms, the timber should be used only when they are known to their characteristics and properties that influence their physical and mechanical behaviour. This takes more relevance when the wood in question comes from the structural elements that have sustained fire. The quality control on this type of timber is unavoidable, and intends to provide guarantees to limit the negative effect caused by the variability of mechanical properties.

This work appeared in the continuity of the dissertation conducted by Samuel Pereira [31], completed at FEUP in 2009 with the aim of completing the statistical analysis on the sub-plot of the samples "Approved" and make a new campaign to validate the experimental the proposed visual classification for old wood *in situ* method "Amorim Faria," using oak wood from fire.

To this end, we applied the criteria in samples taken from the method of structural elements of ancient oak wood from fire and had removed the charred portion before.

The experimental component was established as an essential part in developing this work. The fifty samples were subjected to an intense visual inspection, applying forms of measurement of defects and their limits in method, in order to assign one of two classes suggested: *Approved* or *Rejected*.

It has been over the fifty samples a mechanical bending test, with the aim of determining values for the following mechanical properties, flexural strength and modulus of elasticity in bending, in order to confront the results with those considered in the proposal as and to compare with the results obtained in the previous year.

With this work, particularly with the mechanical test, we managed to see the wood as a structural element, interpreting their behavior meet the demands in question. Moreover, given the results could not validate the proposed classification method "Amorim Faria," these results were also used to understand how it could improve the method of classification of old wood.

KEYWORDS: thermal degradation, mechanical properties, bending test, visual classification, method "Amorim Faria"

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJECTO, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO	1
1.2. BASES DO TRABALHO DESENVOLVIDO.....	2
1.3. ESTRUTURAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. COMPORTAMENTO DA MADEIRA AO FOGO E AO CALOR.....	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. MADEIRA	3
2.2.1. COMPOSIÇÃO	4
2.2.1.1. Composição Macroscópica	4
2.2.1.2. Composição Microscópica	5
2.2.1.3. Defeitos	7
2.2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	10
2.3. ACÇÃO DO FOGO SOBRE A MADEIRA – CONCEITOS GERAIS	10
2.4. REACÇÃO E RESISTÊNCIA AO FOGO	13
2.5. VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE MADEIRA PROVENIENTE DE INCÊNDIO EM ESTRUTURAS NOVAS	16
3. CASO DE ESTUDO 1 – CAMPANHA EXPERIMENTAL 2009.....	19
3.1. OBJECTIVO	19
3.2. CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS.....	19
3.2.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO LOTE	19
3.2.2. CLASSIFICAÇÃO VISUAL.....	20
3.2.3. AMOSTRAS APROVADAS	22
3.2.4. AMOSTRAS REJEITADAS	22

3.3. ENSAIOS À FLEXÃO - CONSIDERAÇÕES GERAIS	23
3.3.1. SETUP DE ENSAIO	23
3.3.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	25
3.3.3. PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS A REGISTRAR	26
3.4. LOTE COMPLETO – RESULTADOS	27
3.4.1. MASSA VOLÚMICA	27
3.4.2. DIAGRAMAS DE ENSAIO.....	29
3.4.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	30
3.4.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE	32
3.5. LOTE DE AMOSTRAS APROVADAS – RESULTADOS	34
3.5.1. MASSA VOLÚMICA	34
3.5.2. DIAGRAMAS DE ENSAIO.....	35
3.5.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	36
3.5.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE	38
3.6. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	38
3.6.1. MASSA VOLÚMICA	38
3.6.2. PRINCIPAIS TIPOS DE ROTURA.....	39
3.6.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	39
3.6.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE	40
3.6.5. RELAÇÃO ENTRE CLASSIFICAÇÃO VISUAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS	41
 4. CASO DE ESTUDO 2 – CAMPANHA EXPERIMENTAL 2010	 43
4.1. OBJECTIVO	43
4.2. CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS	44
4.2.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO LOTE.....	44
4.2.2. CLASSIFICAÇÃO VISUAL.....	44
4.2.3. AMOSTRAS APROVADAS.....	46
4.2.4. AMOSTRAS REJEITADAS.....	46
4.3. ENSAIOS À FLEXÃO - CONSIDERAÇÕES GERAIS	46
4.3.1. SETUP DE ENSAIO	46
4.3.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO	47
4.3.3. PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS A REGISTRAR	48

4.4. LOTE COMPLETO – RESULTADOS	49
4.4.1. MASSA VOLÚMICA	49
4.4.2. DIAGRAMAS DE ENSAIO	51
4.4.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	51
4.4.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE	53
4.5. LOTE DE AMOSTRAS APROVADAS – RESULTADOS	54
4.5.1. MASSA VOLÚMICA	54
4.5.2. DIAGRAMAS DE ENSAIO	55
4.5.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	55
4.5.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE	57
4.6. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	57
4.6.1. MASSA VOLÚMICA	57
4.6.2. PRINCIPAIS TIPOS DE ROTURA	58
4.6.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	58
4.6.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE	59
4.6.5. RELAÇÃO ENTRE CLASSIFICAÇÃO VISUAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS	59
5. INTERPRETAÇÃO GLOBAL DE RESULTADOS	61
5.1. VIABILIDADE DA CLASSIFICAÇÃO <i>IN SITU</i> DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA EXISTENTE	61
5.2. MASSA VOLÚMICA	63
5.3. MECANISMOS DE ROTURA	64
5.4. TENSÃO DE FLEXÃO	66
5.5. MÓDULO DE ELASTICIDADE	68
5.6. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MADEIRA PROVENIENTE DE INCÊNDIO – ALGUMAS REFLEXÕES	69
6. CONCLUSÃO	73
6.1. PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS	73
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	75
BIBLIOGRAFIA	77

<u>ANEXOS</u>	76
----------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIG. 2.1 – Eixos de simetria da madeira (adaptado de [3])	4
FIG. 2.2 – Secção transversal de um tronco de Folhosa (retirado de [1])	5
FIG. 2.3 – Aspecto microscópico da madeira das “Resinosas” (adaptado [3])	6
FIG. 2.4 – Aspecto microscópico da madeira das “Folhosas” (retirado de [2])	6
FIG. 2.5 – Aspecto de nó morto vs nó vivo	7
FIG. 2.6 – Tipos de formas de nós (retirado de [14])	7
FIG. 2.7 – Posição dos nós na secção transversal (retirado de [14])	8
FIG. 2.8 – Idealização dos nós no interior de uma peça e avaliação do KAR total e do KAR marginal (retirado de [1])	8
FIG. 2.9 – Representação esquemática de uma peça de madeira com fio inclinado (retirado de [30]) ..	9
FIG. 2.10 - Tipos de fendas (fonte: ASTM D245-95)	9
FIG. 2.11 – Secção carbonizada de uma viga de madeira (retirado de [17])	11
FIG. 2.12 – Secção carbonizada de madeira (adaptado de [22])	13

CAPÍTULO 3

FIG. 3.1 – Preparação das amostras “G”. Esquerda: vigas de madeira ardida retiradas do palacete; Direita: aspecto final dos provetes “G”, (Pereira, 2009)	20
FIG. 3.2 – Tipo de registo fotográfico realizado. Esquerda: pormenor de um defeito; Direita: vista geral de uma viga (Pereira, 2009)	21
FIG. 3.3 – Esquema de ensaio da norma EN 408	23
FIG. 3.4 – Esquema real de ensaio. (Pereira, 2009)	24
FIG. 3.5 – Pormenor da zona de apoio (Pereira, 2009)	24
FIG. 3.6 – Pormenores do esquema de ensaio. Esquerda: ligação do extensómetro à peça. Direita: zona de carregamento (Pereira, 2009)	25
FIG. 3.7 – Amostras submetidas ao ensaio de flexão (Pereira, 2009)	26
FIG. 3.8 – Fissura prolongada ao longo da peça (Pereira, 2009)	26
FIG. 3.9 – Rompimento na zona traccionada (Pereira, 2009)	26
FIG. 3.10 – Rotura por corte (Pereira, 2009)	27
FIG. 3.11 – Pesagem das vigas (Pereira, 2009)	28
FIG. 3.12 – MASSA volúmica das amostras do lote “G”	29
FIG. 3.13 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento a meio vão – Lote “G”	30
FIG. 3.14 – Resistência à flexão ($f_{m,k}$) - Lote “G”	32

FIG. 3.15 – Módulo de Elasticidade em flexão – Lote “G”	33
FIG. 3.16 – Massa Volúmica das Amostras “Aprovadas”	35
FIG. 3.17 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento a meio vão – Lote “Aprovadas”	36
FIG. 3.18 – Tensão de Flexão Amostras “Aprovadas”	37
FIG. 3.19 – Módulo de elasticidade nas amostras “Aprovadas”	38

CAPÍTULO 4

FIG. 4.1 – Tipo de registo fotográfico realizado. Pormenores de defeitos	45
FIG. 4.2 – Esquema de ensaio	46
FIG. 4.3 – Setup de ensaio	47
FIG. 4.4 – Amostras submetidas ao ensaio de flexão	48
FIG. 4.5 – Exemplos de roturas que tiveram origem em nós presentes nas amostras	48
FIG. 4.6 – Exemplos de roturas que tiveram origem em fendas já existentes na amostra.....	49
FIG. 4.7 – Massa volúmica das amostras do lote “P”	49
FIG. 4.8 – Carga aplicada vs deslocamento a meio vão das amostras do lote “P”	51
FIG. 4.9 – Tensão de flexão das amostras do lote “P”.....	52
FIG. 4.10 – Módulo de elasticidade das amostras do lote “P”	53
FIG. 4.11– Massa volúmica do sub -lote “ Aprovadas”	54
FIG. 4.12 – Carga aplicada vs deslocamento a meio vão das amostras “Aprovadas” do lote “P”	55
FIG. 4.13 – Tensão de flexão do sub lote “ Aprovadas”	56
FIG. 4.14 – Módulo de elasticidade do sub lote “ Aprovadas”	57

CAPÍTULO 5

FIG. 5.1 – Amostras 2009 vs amostras 2010	62
FIG. 5.2 – Massa volúmica lote completo vs lote das “Aprovadas”	64
FIG. 5.3 – Exemplos de roturas evidenciadas nas amostras de 2009 (Pereira, 2009)	65
FIG. 5.4 – Exemplos de roturas evidenciadas nas amostras de 2010.....	66
FIG. 5.5 – Tensão de flexão lote completo vs lote das “Aprovadas”	67
FIG. 5.6 – Módulo de elasticidade lote completo vs lote das “Aprovadas”	69
FIG. 5.7 – Alterações da amostra P36 decorrentes do ensaio à flexão	70

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 2

Quadro 2.1 – Composição Química aproximada, em %, da Madeira	10
Quadro 2.2 – Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte (adaptado de Schaffer, 1973)	11
Quadro 2.3 – Fases de Degradação da Madeira (adaptado [13])	12
Quadro 2.4 – Euroclasses para os materiais de construção (retirado de [16])	14
Quadro 2.5 – Classes de resistência ao fogo (retirado de [18])	16

CAPÍTULO 3

Quadro 3.1 – Método Amorim Faria: proposta de classificação visual <i>in situ</i> - Carvalho e Castanho (Franco, 2008)	21
Quadro 3.2 – Classificação visual atribuída às amostras do lote “G”	22
Quadro 3.3 – Massa volúmica de amostras do lote “G”	28
Quadro 3.4 – Valores estatísticos para a massa volúmica do lote “G”	29
Quadro 3.5 – Resultados dos Ensaios de Flexão do Lote “G”	31
Quadro 3.6 – Valores característicos da resistência à flexão - lote “G”	32
Quadro 3.7 – Valores característicos do módulo de elasticidade em flexão - lote “G”	34
Quadro 3.8 – Massa Volúmica das Amostras “Aprovadas”	34
Quadro 3.9 – Valores Estatísticos para a Massa Volúmica Das Amostras “Aprovadas”	35
Quadro 3.10 – Tensão de Flexão e módulo de Flexão das Amostras “Aprovadas”	37
Quadro 3.11 – Valores Estatísticos para a Tensão de Flexão Das Amostras “Aprovadas”	37
Quadro 3.12 – Valores Estatísticos do Módulo de Elasticidade Das Amostras “Aprovadas”	38

CAPÍTULO 4

Quadro 4.1 – Classificação atribuída às amostras do lote “P”	45
Quadro 4.2 – Massa volúmica de amostras do lote “P”	50
Quadro 4.3 – Valores estatísticos para a massa volúmica do lote “P”	50
Quadro 4.4 – Resultados dos Ensaios de Flexão do Lote “P”	52
Quadro 4.5 – Valores estatísticos para a tensão de flexão do lote “P”	53
Quadro 4.6 – Valores estatísticos para o módulo de elasticidade do lote “P”	53
Quadro 4.7 – Massa Volúmica das Amostras “Aprovadas” do lote “P”	54
Quadro 4.8 – Valores estatísticos para a massa volúmica do sub lote “Aprovadas”	55

Quadro 4.9 – Valores para a tensão e módulo de elasticidade em flexão do sub- lote “P”	56
Quadro 4.10 – Valores estatísticos para a tensão de flexão do sub lote “Aprovadas”	57
Quadro 4.11 – Valores estatísticos para o módulo de elasticidade do sub lote “Aprovadas”	57

1

INTRODUÇÃO

1.1. OBJECTO, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO

Esta dissertação tem como tema “Avaliação do Comportamento Mecânico de Madeira Antiga de Carvalho Proveniente de Incêndio”.

Até ao início do século XX a madeira era o material de construção mais utilizado na concepção estrutural dos edifícios, dado apresentar um comportamento mecânico satisfatório para as acções, tipo de utilização pretendida e também por ser uma matéria-prima acessível e disponível em quantidade suficiente. Com o aparecimento e crescente utilização do Betão e do Aço na construção dada à sua grande versatilidade e comportamento quando utilizados conjuntamente, a madeira foi reportada para segundo plano, sendo menosprezado o contributo que até então lhe tinha sido atribuído.

Com uma sociedade cada vez mais atenta à preservação do meio-ambiente, surge uma nova e crescente preocupação com a reutilização de materiais e com a adopção de técnicas e produtos mais “verdes”. O sector da construção não é excepção e nos últimos anos verifica-se um progresso significativo na reabilitação de edifícios e na adopção de materiais e técnicas de construção mais ecológicos.

Com o crescimento do segmento da reabilitação torna-se primordial apostar na reutilização dos materiais de construção presentes nesses edifícios. Para uma reabilitação cuidada e eficaz é necessário conhecer com profundidade os materiais presentes, designadamente a nível estrutural, conhecer a sua resistência. No caso de madeiras que tenham sofrido incêndio o estudo da integridade física da peça e o seu comportamento mecânico toma especial interesse.

A presente dissertação resulta da necessidade de continuar a investigação iniciada em 2009 por Samuel Pereira [31] sobre o comportamento mecânico da madeira ardida, incidindo particularmente na análise de madeira de carvalho antiga.

No presente ano realizou-se uma nova campanha experimental, que consistiu na realização de ensaios à flexão e na classificação das amostras pelo método “Amorim Faria”. Com os resultados obtidos nesta campanha será possível reavaliar algumas das conclusões obtidas no ano anterior.

O interesse destas campanhas incide na interpretação do comportamento mecânico de peças de madeira antiga solicitadas à flexão e a sua relação com o fogo, nomeadamente, nas dúvidas que possam surgir no que se refere à integridade intrínseca da madeira ardida das peças em estudo.

Estudar o efeito do incêndio nas propriedades mecânicas da madeira e a veracidade da relação entre a classificação visual pelo método “Amorim Faria” e as propriedades mecânicas obtidas pelos ensaios à flexão é a base que sustenta esta tese.

1.2. BASES DO TRABALHO DESENVOLVIDO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação apoiou-se essencialmente nos resultados obtidos nas campanhas experimentais efectuadas no presente ano e no ano de 2009, e na consulta de diversas publicações referidas na bibliografia.

Com o intuito de melhor enquadrar esta tese, foram consultadas diversas referências bibliográficas, desde trabalhos recentes de teses de doutoramento e de mestrado, a documentos relacionados com as madeiras em geral e do comportamento ao fogo da madeira.

Destacam-se, neste contexto, a tese de mestrado em engenharia florestal de Karina Moedes [8] e as teses de mestrado integrado em engenharia civil de Sónia Franco [30] e Samuel Pereira [31].

Para além destas referências, o trabalho experimental levado a cabo no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), foi importante na medida em que serviu de suporte para a validação do método de classificação visual *in situ* “Amorim Faria” para a madeira antiga que provém de incêndio.

1.3. ESTRUTURAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos:

O presente capítulo introduz uma breve exposição do trabalho, apresentando-se os objectivos que se pretendem alcançar, a razão pela qual se justifica a sua realização e os meios utilizados, assim como uma síntese do seu conteúdo.

No Capítulo 2, dá-se a conhecer noções gerais acerca da madeira atendendo à sua estrutura, defeitos e composição química. Tem ainda ênfase o comportamento e alterações que a madeira apresenta quando submetida ao fogo e/ou calor, e ainda a viabilidade da utilização de madeira proveniente de incêndio a nível estrutural.

O Capítulo 3 descreve todo o procedimento realizado na campanha experimental realizada por Samuel Pereira em 2009, apresenta-se a classificação visual, os resultados estatísticos obtidos para o lote de amostras completo e para o lote das amostras “Aprovadas” pela inspecção visual e ainda os principais modos de rotura.

No Capítulo 4, descreve-se o trabalho experimental realizado pelo Autor, relativo à classificação visual *in situ* das vigas de madeira proveniente de incêndio e dos ensaios à flexão efectuados sobre as vigas referidas. A estrutura e o conteúdo são idênticos ao apresentado no capítulo 3.

No Capítulo 5, apresentam-se os principais resultados obtidos nas campanhas experimentais e da articulação destes com a classificação atribuída pelo método “Amorim Faria” às amostras por inspecção visual

Por fim, o Capítulo 6 descreve as conclusões da dissertação onde são sintetizados os principais resultados obtidos ao longo do trabalho e é avaliado o cumprimento dos objectivos inicialmente propostos. Apresentam-se, ainda, algumas sugestões para desenvolvimentos futuros da dissertação, que se podem genericamente resumir como sugestões de investigação na área da madeira ardida.

2

COMPORTAMENTO DA MADEIRA AO FOGO E AO CALOR

2.1. INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos e possui enormes potencialidades na indústria da construção. Apresenta bom desempenho quando aplicada em edifícios projectados, construídos e mantidos de forma adequada, embora o seu uso como material de construção seja limitado devido ao preconceito relativo à sua reacção ao fogo. A madeira é um material combustível e, como os demais materiais combustíveis sólidos, quando aquecida, liberta gases combustíveis que, quando expostos ao calor, queimam e produzem chama. Os gases quentes e as chamas, por sua vez, aquecem a porção de madeira ainda não atingida pelo calor e promovem a libertação de mais gases inflamáveis, gerando uma reacção em cadeia que alimenta a combustão.

A madeira quando submetida a uma situação de incêndio queima. Porém, tanto a madeira como o carvão oriundo da combustão da primeira são isolantes térmicos e retardam o fluxo de calor para o interior da secção, diminuindo a velocidade da degradação térmica e retardando o avanço da frente de carbonização. Dessa forma, quando submetidos ao fogo, os elementos estruturais de madeira exibem no seu interior, após a camada carbonizada, uma estreita camada aquecida, cujas propriedades mecânicas são afectadas pelo calor, e um núcleo que permanece relativamente inalterado.

O estudo deste material à acção do calor e/ou fogo toma especial interesse quando é usado como elemento estrutural, uma vez que as alterações na sua estrutura interna, propriedades físicas e mecânicas, devido às elevadas temperaturas a que é sujeito condicionam o seu comportamento para os diferentes tipos de esforços e acções a que está usualmente sujeito.

2.2. MADEIRA

A madeira é um material de origem biológica, formado por uma matéria heterogénea e anisotrópica elaborada por um organismo vivo, que é a árvore.

A madeira é constituída pelas paredes rijas e resistentes das células mortas do lenho. Embora se possa aproveitar a madeira resultante das desramas, a maioria do material lenhoso utilizado provém do tronco da árvore. Além de constituir o suporte do organismo vegetal durante a vida da árvore, o tronco desempenha a condução das matérias necessárias ao processo de fotossíntese (seiva bruta) e o armazenamento de substâncias elaboradas e de água, durante os períodos de menor actividade fisiológica ou mesmo de repouso [1].

As madeiras podem ser divididas em duas famílias, as “Folhosas” e as “Resinosas”, estas famílias diferem não só na sua constituição e organização celular mas também ao nível das propriedades físicas e mecânicas com importância sob o ponto de vista de engenharia. As “Folhosas” provêm de árvores de

folhas caduca e normalmente são designadas por madeiras duras. São exemplo desta espécie o carvalho e o castanheiro. Por seu turno as “Resinosas” provêm de árvores de folha permanente e são madeiras mais brandas, casos do pinheiro e do cedro.

Em virtude da sua origem biológica, a estrutura celular é única e irrepetível, quer entre espécies quer mesmo entre elementos da mesma espécie. Assim, a estrutura da madeira, a nível molecular, celular e anatómica, condiciona as suas características e vai reflectir-se nas suas propriedades físicas e mecânicas, originando o comportamento distinto das propriedades em cada árvore.

Esta característica é uma das mais marcantes do material e é denominada de anisotropia, ou seja a constatação de que as propriedades físicas e mecânicas variam conforme a direcção das fibras considerada: radial, transversal ou longitudinal. A anisotropia explica, por exemplo, a razão pela qual os movimentos provocados pela variação da humidade presente são 10 a 20 vezes superiores na direcção transversal do que na direcção longitudinal.

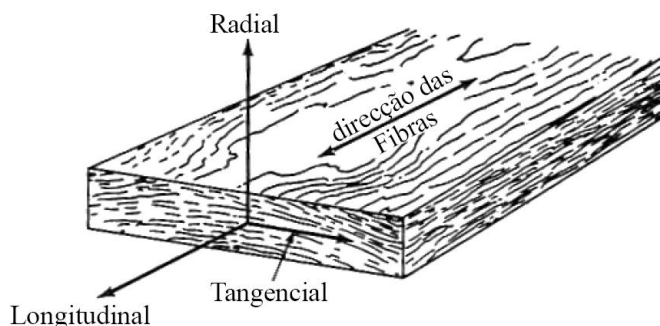


Fig.2.1 – Eixos de simetria da madeira (adaptado de [3])

2.2.1. COMPOSIÇÃO DA MADEIRA

2.2.2.1. Estrutura Macroscópica

A estrutura macroscópica da madeira, é a estrutura do tecido celular visível a olho nu, através de um corte transversal do tronco (figura 2.2). O crescimento da árvore em diâmetro é devido à produção de novas células, na zona do câmbio, constituída por células vivas que dão origem aos anéis de crescimento, o qual produz lenho para o interior, bem como casca e entrecasco para o exterior, enquanto se afasta progressivamente da medula.

Uma secção transversal torna possível observar o padrão de anéis de crescimento. Cada anel é constituído por uma zona clara mais espessa (madeira de Primavera ou lenho inicial) e outra mais escura e fina (madeira de Verão ou lenho final), o que permite determinar a idade da árvore.

Cada conjunto de anéis (zona clara e escura) representa um ano. Em espécies provenientes de climas tropicais, em virtude da baixa amplitude térmica anual, a diferenciação dos anéis é ténue ou mesmo indistinguível.

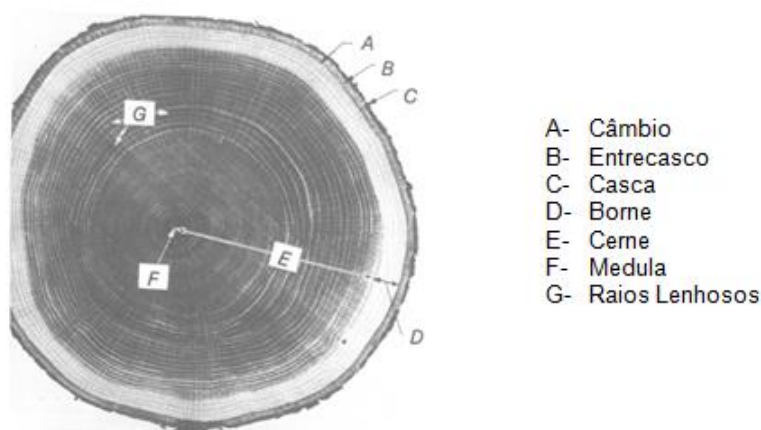


Fig.2.2 – Secção transversal de um tronco de “Folhosa” (retirado de [1])

O material lenhoso que compõe a madeira organiza-se então pelas seguintes camadas:

- **Medula**, tecido macio, em torno do qual se verifica o crescimento inicial dos ramos novos;
- **Cerne**, a zona envolvente da medula, também designado por durâmen, constitui uma camada morta, sendo formado por células que cessaram a sua função; esta zona vai ao longo do tempo acumulando a lenhina, que lhe confere dureza e resistência ao ataque de insectos e fungos e a sua principal função é a de sustentar o tronco;
- **Borne ou alburno**, é a camada de células vivas que conduzem a seiva proveniente das raízes e acumula nutrientes; a sua área é aproximadamente inalterável ao longo do tronco;
- **Cambio ou líber**, é uma camada microscópica sob a casca, responsável pelo crescimento do borne no sentido do exterior;
- **Casca**, camada protectora externa de espessura variável com a espécie e idade constituída por duas sub-camadas: uma externa, contendo células mortas, e outra subjacente, de tecido vivo e macio, que conduz os nutrientes provenientes das folhas.

É a este nível que se centra a análise dos defeitos de crescimento e os seus efeitos no comportamento mecânico da madeira [2].

2.2.2.2. Estrutura Microscópica

Como já foi referido, as espécies lenhosas são divididas botanicamente em duas grandes famílias: “Folhosas” (Angiospérmicas) e “Resinosas” (Gimnospérmicas). As “Folhosas” apresentam-se como um vasto grupo botânico que contém não só árvores como plantas de flor e de fruto, ervas mas também contém em si espécies lenhosas capazes de providenciar das madeiras mais duras às mais macias. As “Resinosas” são um grupo botânico mais primitivo, basicamente constituídos só por árvores, e no qual estão incluídas as coníferas [2,3,4,5].

É no entanto ao nível da sua estrutura celular que surgem, botanicamente, as principais diferenças. Os troncos das “Resinosas” (figura 2.3) são constituídos por 90 a 95% de traqueídeos - células ocas e alongadas com 2 a 5 mm de comprimento e 10 a 50 mm de diâmetro, de topos abaulados ou abertos (nas coníferas) que transportam a seiva ao longo do tronco [3].

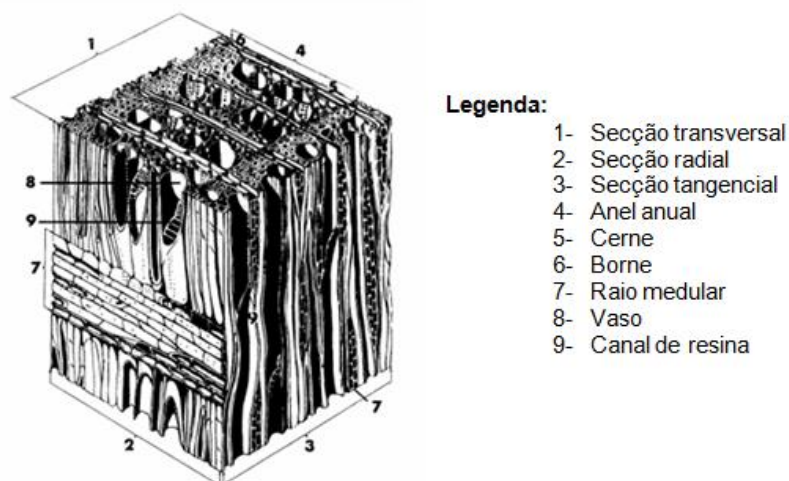


Fig.2.3 – Aspecto microscópico da madeira das “Resinosas” (adaptado [3])

As células justapõem-se topo a topo na direcção longitudinal, originando fibras que se organizam em planos radiais, dispersos pela secção do tronco, formando canais de resina. Observa-se na morfologia celular das “Resinosas” que estas apresentam uma considerável variedade na forma e tipos de células, atribuindo funções de transporte e suporte a tipos celulares distintos [3].

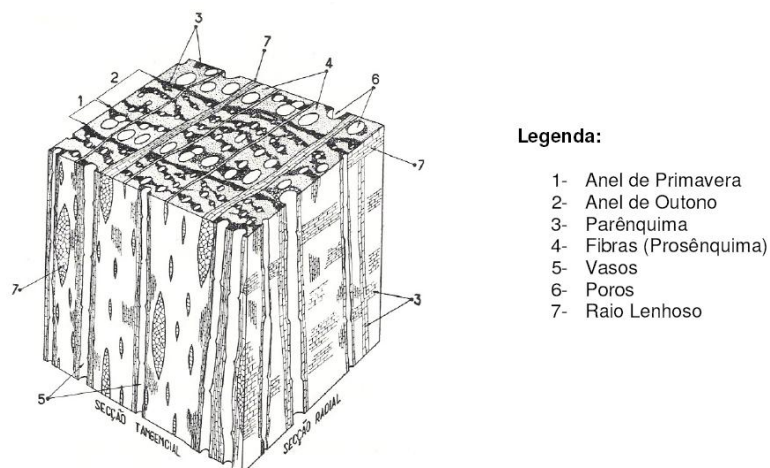


Fig.2.4 – Aspecto microscópico da madeira das “Folhosas” (retirado de [2])

O armazenamento e a distribuição de alimento estão a cargo das células do parênquima, constituindo o revestimento dos canais de resina, embora, geralmente, se agrupem também em fibras radiais designadas por raios medulares. A troca de fluído é facilitada por numerosos orifícios de dimensão considerável, possíveis, frequentemente, de serem vistos a olho nu na superfície transversa da madeira, dando um aspecto considerado poroso à secção [3]. Estes poros funcionam como válvulas, que impedem a entrada de ar que entupiria a circulação proveniente da raiz e mataria a árvore. Claro que estas válvulas dificultam a secagem conveniente ou o tratamento por impregnação.

Nas “Folhosas”, a função de troca cabe aos traqueídeos, sendo a circulação de seiva feita em células longitudinais de topos abertos, que se justapõem formando vasos ou canais, que se podem distribuir de formas diversas na secção.

O estudo a este nível possibilita, por exemplo, entender o carácter anisotrópico da madeira, patente por exemplo no facto da madeira ser 20 a 40 vezes mais rígida na direcção longitudinal quando comparada com a direcção transversal. Baseia-se na observação da disposição das células e nos seus efeitos.

2.2.2.3. Defeitos

A qualidade de uma peça de madeira é medida pelas características médias do lenho e pelo tipo, quantidade e distribuição de defeitos que apresenta. A norma NP180 [7] apresenta uma descrição exhaustiva dos defeitos da madeira.

Os principais defeitos e características mais significativos, tendo em vista a utilização da madeira para fins estruturais são:

- Nós;
- Fio Inclinado;
- Fendas;
- Descaio.

Os **nós** são porções dos ramos das árvores que ficam embebidos no interior dos troncos aquando do crescimento destes. Se o ramo estava morto quando foi embebido trata-se de um nó morto se o ramo estava vivo trata-se de um nó vivo. A ligação entre o lenho do nó e o do tronco principal é fraca, principalmente caso se trate de um nó morto.

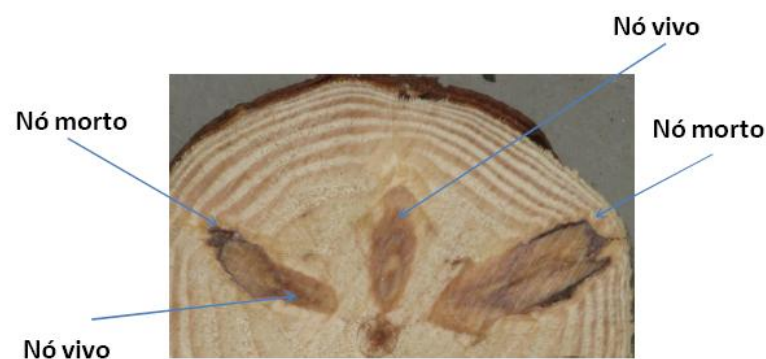


Fig.2.5 – Aspecto de nó morto vs nó vivo

Os nós podem ser classificados quanto à sua forma e em função da sua posição na secção transversal. Nas figuras 2.6 e 2.7 podem ser consultados desenhos esquemáticos destas duas classificações.



Fig.2.6 – Tipos de formas de nós (retirado de [14])



Fig.2.7 – Posição dos nós na secção transversal (retirado de [14])

O carácter depreciativo dos nós depende do tipo de utilização estrutural ou não estrutural. Para utilizações não estruturais, em que o aspecto é importante, procura-se geralmente que os nós estejam distribuídos de modo uniforme, tenham pouca expressão nas faces da peça (pequenos diâmetros) e sejam sãos ou aderentes.

A influência dos nós na resistência mecânica da madeira deriva do facto deles corresponderem a material inserido numa peça, cujas fibras são aproximadamente perpendiculares à direcção geral das fibras da peça. Dada a forte anisotropia da madeira, traduzida por uma resistência à tracção na direcção perpendicular às fibras cerca de 30 vezes inferior à direcção paralela, facilmente se compreende que, independentemente de se tratar de nós ou grupos de nós aderentes, soltadiços ou buracos de nós, é desprezável a contribuição da parte da secção transversal correspondente. Por esta razão, para utilizações estruturais [1], os limites impostos aos nós ou grupos de nós, são estabelecidos em termos de percentagem de secção transversal da peça que eles ocupam, designada vulgarmente por KAR (knot área ratio), figura 2.8.

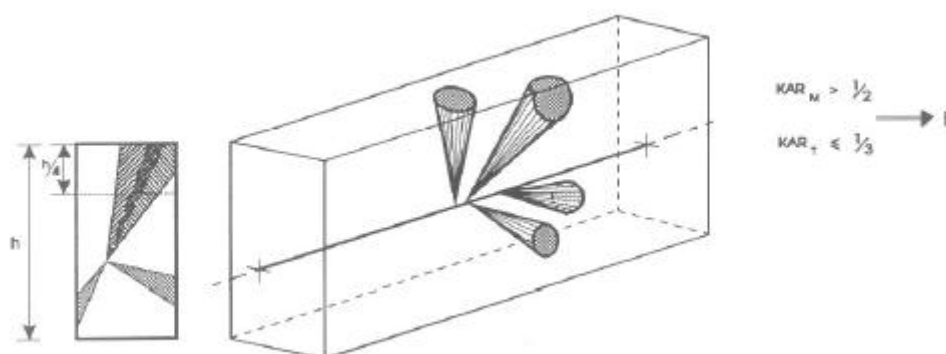


Fig.2.8 – Idealização dos nós no interior de uma peça e avaliação do KAR total e do KAR marginal (retirado de [1])

O **fio inclinado** é uma anomalia traduzida pela existência de um ângulo entre a direcção geral das fibras da madeira e o eixo longitudinal da peça. Pode resultar de anomalias de crescimento, como o fio torcido ou a curvatura do tronco, ou da serragem oblíqua da peça. As suas consequências prendem-se uma vez mais com a anisotropia do material, por haver um afastamento da situação ideal da aplicação dos esforços paralelamente ao fio da madeira.

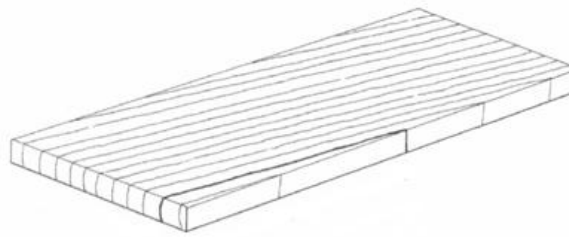


Fig.2.9 – Representação esquemática de uma peça de madeira com fio inclinado (retirado de [30])

As **fendas** induzem descontinuidade no material lenhoso e os seus efeitos na resistência dependem do tipo de esforço considerado, da sua localização, comprimento e profundidade, bem como de eventual associação com outros defeitos, como nós ou fio inclinado.

As fendas de secagem (superficiais e repassadas) desenvolvem-se no sentido das fibras da madeira, partindo da periferia para a medula. Embora haja madeiras com maior propensão para fender que outras. O seu desenvolvimento é potenciado por processos de secagem bruscos, com elevados gradientes de teor em água na secção transversal das peças, sendo um defeito de laboração.

As fendas anelares resultam do deslocamento entre camadas de crescimento consecutivas, tendo um desenvolvimento circular. Podem ocorrer em árvores sujeitas, durante o crescimento, a flexões frequentes e excessivas, nomeadamente por acção de vento intenso, ou ainda por defeitos de congelação.

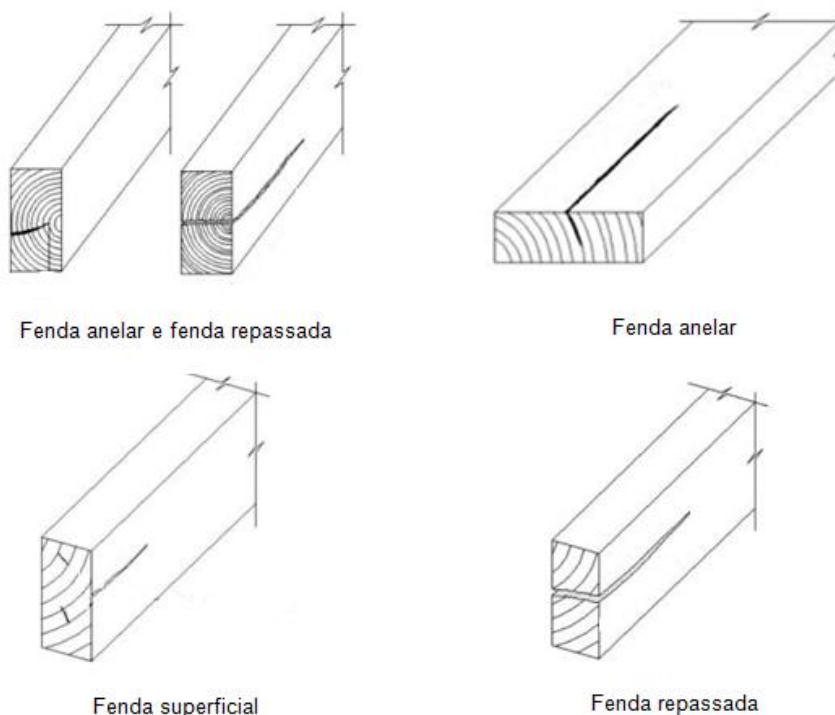


Fig.2.10 – tipos de fendas (fonte: ASTM D245-95)

O **descaio** reflecte o remanescente da superfície do toro da peça de madeira, sendo um defeito de laboração. Implica sobretudo dificuldades de fixação, apoio ou colagem, já que a perda de resistência devida à redução de secção transversal é geralmente desprezável.

2.2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A compreensão da estrutura da madeira pode ser feita através do arranjo das suas células, mas também, e mais fundamentalmente, com base na organização e química das substâncias da parede celular [10].

As paredes celulares, primária e secundária, são formadas por três constituintes principais: celulose e hemicelulose, ambos polissacarídeos, e lenhina, um polímero aromático. A celulose pode ser comparada a um esqueleto que dá forma e estrutura à parede celular e inicialmente se encontra embebida numa matriz porosa, amorfa de hemicelulose, sendo que mais tarde estes polissacarídeos são incrustados e aglutinados com lenhina, que é considerado um polímero tridimensional muito estável.

Algumas diferenças marcantes ocorrem entre “Folhosas” e “Resinosas” em termos de composição química bruta da madeira. De acordo com o quadro 2.1, a hemicelulose está presente em maior quantidade na madeira de “Folhosas” do que nas “Resinosas”, ao passo que a lenhina apresenta-se em maior quantidade nas “Resinosas” e menor quantidade nas “Folhosas”. A percentagem de celulose por sua vez é maior nas “Folhosas”, sendo extractivos os únicos que apresentam valores iguais para ambas as espécies.

Quadro 2.1 – Composição Química aproximada, em %, da Madeira (adaptado de MORAIS et al., 2005)

Componentes Químicos	Madeiras Resinosas	Madeiras Folhosas
Celulose	42±2	45±2
Hemicelulose	27±2	30±5
Lenhina	28±3	20±2
Extractivos	3±2	3±2

De entre os componentes estruturais, o principal componente da parede celular de “Folhosas” e “Resinosas” é a celulose, um polímero linear de grau de polimerização elevado, responsável por grande parte das propriedades da madeira. As hemiceluloses, são polímeros lineares ramificados com grau de polimerização baixo e que, à semelhança da celulose, funcionam como material estrutural, além de servirem como substância de reserva. O último componente estrutural é a lenhina, uma substância amorfa com estrutura tridimensional que é responsável pela rigidez da parede celular e consequente resistência mecânica. Os extractivos são moléculas pequenas, cuja designação advém de poderem ser retirados da madeira através de solventes. Muitas vezes exercem funções de defesa contra xilófagos, outras são responsáveis pela cor e cheiro das madeiras, mas na maioria das vezes não possuem qualquer função específica [9].

2.3. ACÇÃO DO FOGO E DO CALOR NA MADEIRA – CONCEITOS GERAIS

A madeira, apesar de ser um material combustível, apresenta um bom desempenho quando utilizada em estruturas resistentes ao fogo. A superfície de uma peça de madeira exposta a temperaturas elevadas durante períodos de tempo prolongados à acção do fogo, experimenta uma decomposição química, ou pirólise, que gera gases inflamáveis, que começam a arder, resultando numa carbonização superficial. A condutividade térmica da madeira e do carvão é muito baixa, pelo que no interior da madeira carbonizada os incrementos de temperatura e consequentemente as reduções nas propriedades mecânicas são aliás relativamente moderadas. O carvão forma uma camada que limita, tanto a condução do calor para a madeira interior, como também a passagem dos gases inflamáveis que constituem o combustível do fogo desde o interior para o exterior. Desta forma, apesar de ser

combustível, quando a utilização se faz pela aplicação de peças de dimensões transversais suficientemente grandes, a madeira pode ser considerada como um material de construção resistente ao fogo.

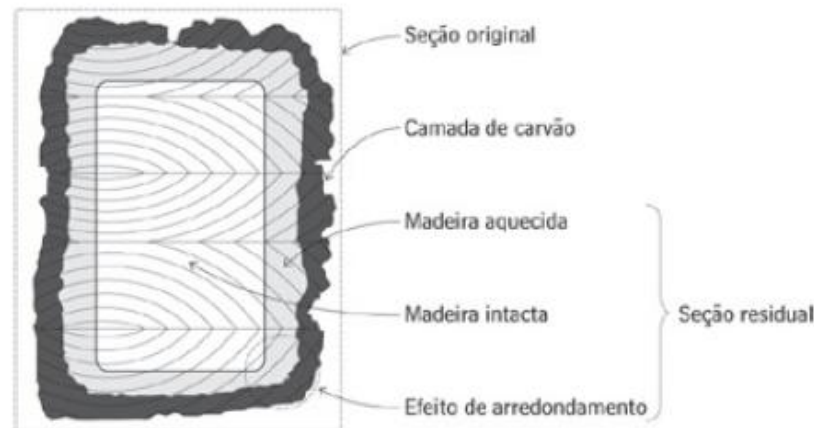


Fig.2.11 – Seção carbonizada de uma viga de madeira (retirado de [17])

A madeira, por ser um polímero natural, quando submetida ao fogo, sofre despolimerização e carbonização, alterando as suas propriedades mecânicas conforme o nível de temperatura e tempo de exposição ao calor ao qual foi submetida. No quadro 2.2 estão sintetizadas algumas das alterações químicas que a acção da temperatura causa no tecido lenhoso.

Quadro 2.2 – Alterações provocadas termicamente na madeira seca em atmosfera inerte (adaptado de Schaffer (1973))

Temperatura (°C)	Alterações na Madeira
55	A estrutura natural da lenhina é alterada. A hemicelulose começa a amolecer.
70	Começa a retracção transversal da madeira.
110	A lenhina começa lentamente a perder peso.
120	O teor da hemicelulose começa a diminuir e a celulose alfa começa a aumentar. A lenhina começa a amolecer.
140	A água de impregnação é libertada
160	A lenhina funde-se e começa a ressolidificar.
180	A hemicelulose começa a perder peso rapidamente depois de ter perdido 4% do peso inicial. A lenhina da membrana de pontuação desaparece.
200	A madeira começa a perder peso rapidamente. As resinas fenólicas começam a formar-se e a celulose desidrata-se.
210	A lenhina solidifica. A celulose amolece e despolimeriza-se. As reacções endotérmicas transformam-se em exotérmicas.
225	A cristalinidade da celulose diminui e é retomada
280	A lenhina perde 10% do seu peso inicial. A celulose começa a perder peso.
288	Temperatura adoptada para a carbonização da madeira.
300	O cerne amolece irrecuperavelmente.
320	A hemicelulose é completamente degradada
370	A celulose apresenta perdas de 83% do seu peso inicial.
400	A madeira é completamente carbonizada.

O gradiente térmico provocado pelo aquecimento diferencial do material induz a transferência de água, e consequentemente, a secagem do material. No entanto, quando as temperaturas forem elevadas, ocorre a despolimerização da madeira com a libertação de gases voláteis inflamáveis ou não, a combustão do material lenhoso, a carbonização e a combustão incandescente do carbono fixo.

A combustão traduz-se na transformação térmica em presença de oxigénio ou ar, em quantidade suficiente para promover a sua decomposição completa por uma fonte externa de calor. Quando esta transformação não tem a quantidade suficiente de oxigénio, ou a quantidade é controlada, ocorre carbonização, cujo resíduo sólido é o carvão.

A degradação térmica da madeira depende significativamente da espécie da botânica, dos anéis de crescimento e do teor de humidade do material. No quadro 2.3 estão expostas as cinco fases que traduzem o processo de degradação da madeira em função da temperatura e na figura 2.12 estão ilustrados os locais onde elas ocorrem.

Quadro 2.3 – Fases de Degradação da Madeira (adaptado [13])

Fase	Temperatura	Fenómeno
I	Até 200°C	- Processo denominado de pirólise lenta
		- Libertação de vapor de água e gases
		- A madeira não se auto igniza
		- Existência de algumas reacções exotérmicas de oxidação
		- Mudança de cor
II	200 a 280°C	- Aumento da degradação química
		- Ocorrência de reacções exotérmicas primárias sem inflamação.
		- Temperatura considerada como a temperatura de ignição.
		- Fase conhecida como pirólise rápida.
III	280 a 380 °C	- Produção de grandes quantidades de destilados, principalmente ácidos acéticos e metanol.
		- O resíduo final dessa fase já é carvão vegetal, mas que ainda apresenta compostos volatilizáveis em sua estrutura.
		- Fase exotérmica.
		- Redução da emissão de gases.
IV	380 a 500 °C	- Produção de ácido acético, metanol, alcatrão e diversas substâncias gasosas condensáveis.
		- A perda de massa é da ordem de 70% em relação à massa original.
		- Fase exotérmica.
		- Término da carbonização e início da gaseificação do carvão.
V	Acima de 500 °C	- O carvão é o resíduo principal.
		- No interior da madeira permanece a temperatura das fases I, II e III.
		- Fase exotérmica.

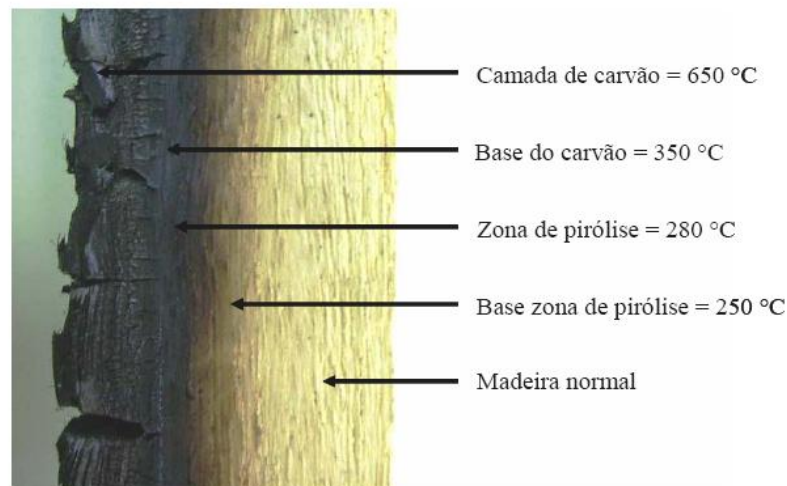


Fig.2.12 – Secção carbonizada de madeira (adaptado de [22])

A influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas da madeira submetida a altas temperaturas pode-se manifestar quer por efeitos temporários quer por efeitos permanentes, os quais dependem do grau de degradação do material causado pela exposição ao calor e pela temperatura.

Os efeitos temporários são aqueles que desaparecem após o arrefecimento da madeira, não se verificando reduções nas propriedades mecânicas nem alterações significativas na estrutura físico-química da madeira. Estes efeitos ocorrem quando a temperatura máxima atingida é inferior a 65°C.

Os efeitos permanentes não desaparecem após o arrefecimento da madeira e ocorrem a temperaturas superiores a 65°C. Dependem da temperatura e do teor de água da madeira e são provenientes, provavelmente, das reacções de despolimerização, nas quais a ruptura das ligações químicas começa a ocorrer a temperaturas superiores a 100°C.

Os efeitos permanentes manifestam-se pela perda do peso dos carboidratos, pela perda de água de adesão e pelo amolecimento da lenhina e reflectem-se directamente nas propriedades mecânicas da madeira.

2.4. REACÇÃO E RESISTÊNCIA AO FOGO

A **reacção ao fogo** traduz a contribuição que um dado material pode trazer para a produção e desenvolvimento de um incêndio. Vários factores condicionam a reacção ao fogo: inflamabilidade, combustibilidade, velocidade de propagação das chamas, gotejamento de materiais fundidos, produção de gases, fumos e vapores [21].

A avaliação destes parâmetros é relevante nos primeiros momentos de desenvolvimento do fogo que é o estado em que os elementos da madeira podem contribuir mais fortemente para o desenvolvimento do fogo.

A classificação de reacção ao fogo dos materiais de construção é representada por uma nomenclatura, separada entre as classes de reacção ao fogo para os pavimentos e seus respectivos revestimentos, e para os restantes materiais, de acordo com as Euroclasses seguintes:

- A1 – nenhuma contribuição para o fogo;
- A2 – contribuição para o fogo quase nula;
- B – contribuição para o fogo muito limitada;
- C – contribuição para o fogo limitada;
- D – contribuição para o fogo aceitável;
- E – reacção ao fogo aceitável;
- F – comportamento não determinado.

O quadro 2.4 apresenta as Euroclasses disponíveis e os critérios de aplicação aos materiais correntes, as letras indicadas têm os seguintes significados de acordo com exposto no decreto-lei nº 220/2008:

- s1 – $\text{SMOGRA} \leq 30 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ e $\text{TSP}_{600\text{s}} \leq 50 \text{m}^2$;
- s2 – $\text{SMOGRA} \leq 180 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ e $\text{TSP}_{600\text{s}} \leq 200 \text{m}^2$;
- s3 – nem s1 nem s2;
- d0 – Não se verifica a libertação de gotas/partículas inflamadas no ensaio EN 13823
- d1 – Não se verifica a libertação de gotas/partículas inflamadas com duração superior a 10s no ensaio EN 13823 (SBI) em 600s;

Quadro 2.4 – Euroclasses para os materiais de construção (retirado de [16])

Produtos de construção – excepto pavimentos			
Euroclasses			Exigências Actuais
	(Produção de fumo)	(Produção de gotículas)	
A1	-	-	M0
A2	s1	d0	M0
	s1	d1	
A2	s2	d0	
	s3	d1	
	s1	d0	M1
B	s2	d1	
	s3	-	
	s1	d0	
C	s2	d1	M2
	s3	-	
	s1	d0	M3
D	s2	d1	M4
	s3	-	(Não gotejante)
E – F	-	-	M4

Num cenário de fogo há dois períodos diferentes que devem ser considerados num projecto de segurança contra incêndio de um edifício e que são a eclosão e desenvolvimento inicial do fogo e o fogo generalizado (*Flash Over*).

Após ignição, a carga térmica do interior do edifício, como por exemplo o mobiliário, tem uma grande importância no desenvolvimento do fogo, mas normalmente não faz parte dos códigos de construção definir os limites desses valores.

Os revestimentos de paredes e tectos também têm um papel importante no desenvolvimento do fogo especialmente nos caminhos de fuga e particularmente nos edifícios com muitos pisos. Normalmente, nos regulamentos, são impostos limites ao grau de reacção ao fogo desses revestimentos.

A afirmação da conformidade do uso de materiais de construção, no âmbito das exigências da Segurança Contra Incêndio em Edifícios, tem por base ensaios de reacção ao fogo que deverão, na perspectiva da harmonização europeia para os produtos da construção, indicar, a título de exemplo, a classificação de vários materiais de acordo com as Euroclasses de reacção ao fogo atrás definidas. Exemplos dessa classificação incluem:

- A1..... Pedra;
- B..... Madeira trata com retardante de fogo (FR);
- C..... Revestimentos de paredes com placas de gesso;
- D..... Madeira maciça e painéis de madeira não tratados;
- E..... Polímeros sintéticos;
- F..... Outros Polímeros.

A **resistência ao fogo** define-se como o intervalo de tempo durante o qual provetes de elementos de construção, componentes ou estruturas sujeitos a ensaios normalizados desempenham funções semelhantes do ponto de vista de segurança contra incêndio às que lhe são exigidas no contexto da edificação [21].

A resistência ao fogo da madeira exprime-se, em traços gerais, como sendo o tempo, em minutos, durante o qual um determinado sistema construtivo mantém, em condições de fogo normalizado as exigências que lhe são exigidas regularmente na perspectiva da segurança estrutural.

Os elementos de construção devem atender a certos requisitos no que se refere à segurança contra incêndio, nomeadamente cumprindo as seguintes condições:

- A) Estabilidade / Capacidade de suporte;
- B) Ausência de emissão de gases inflamáveis pela face não exposta ao fogo;
- C) Estanqueidade à passagem de chamas e gases quentes;
- D) Resistência térmica suficiente para impedir que na face não exposta se alcancem temperaturas superiores às estabelecidas pelos regulamento.

O quadro 2.5 pretende conciliar a nomenclatura usada antes da entrada em vigor da nova regulamentação com a que actualmente é utilizada, de acordo com as Euroclasses. Estas classes de resistência ao fogo referem-se a cenários de fogo e a critérios de desempenho aplicáveis à função estrutural em situações de compartimentação, desenfumagem e continuidade do serviço.

Quadro 2.5 – Classes de resistência ao fogo (retirado de [18])

Funções do elemento de construção	EXIGÊNCIAS			
	Estabilidade	Estanqueidade	Isolamento Térmico	Radiação
Suporte	R (EF)	-	-	-
Compartimentação	-	E (PC)	-	E W
		EI (CF)		-
Suporte + Compartimentação	-	RE (PC)		E W
		R E I (CF)		-

Por comparação com outros elementos de construção tradicionais, verifica-se que a madeira apresenta uma excepcional resistência ao fogo. Ao contrário do que ocorre com estruturas em aço em que o colapso, por acção do fogo, resulta da diminuição das propriedades mecânicas do material com o aumento da temperatura, a falha da capacidade de suporte, na madeira, só acontece pela perda, por carbonização, da secção resistente.

A resistência ao fogo de um elemento ou estrutura de madeira (em tempo) depende da existência de uma camada protectora ou espessura da camada carbonizada da madeira e das dimensões da secção residual, as quais dependem da taxa de carbonização da espécie de madeira usada.

2.5. VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DA MADEIRA PROVENIENTE DE INCÊNDIO EM ESTRUTURAS NOVAS

A crescente preocupação com a preservação do meio-ambiente e a sustentabilidade dos sistemas, tem levado a um progresso significativo na reutilização dos materiais e na reabilitação do património edificado. Neste contexto surge a necessidade de se estudar a viabilidade que a madeira proveniente de incêndio apresenta quando utilizada em estruturas novas ou na reabilitação de edifícios.

Dada a escassez de estudos sobre as alterações das propriedades mecânicas de madeira proveniente de incêndio, procurou-se estabelecer um paralelismo entre as modificações nas propriedades químicas e mecânicas verificadas na madeira modificada por tratamento térmico e aquelas que se verificam quando sujeita a incêndio, de forma a determinar a viabilidade da utilização de madeira proveniente de incêndio em estruturas.

Diferentes técnicas têm sido estudadas ou usadas com vista à modificação de algumas propriedades da madeira, sendo o tratamento térmico conhecido como um dos mais antigos, fácil e barato, apresentando melhorias no que se refere à capacidade repelente à água, estabilidade dimensional e resistência biológica da madeira [23].

A modificação térmica da madeira, apesar de melhorar a resistência ao apodrecimento e a estabilidade dimensional, tem um efeito redutor nas propriedades mecânicas. A madeira torna-se mais rígida e frágil, e certas propriedades mecânicas reduzem-se, dependendo da temperatura máxima de tratamento, da taxa de aquecimento, da duração do tratamento à temperatura máxima e da humidade. Estes parâmetros podem levar ao aparecimento de fendas e a estrutura da parede celular pode ser parcialmente degradada. Além disso, um dos factores que contribuem para a perda de resistência é o facto de o tratamento de modificação térmica resultar na perda de peso pela madeira, dependendo da temperatura e tempo de exposição ao tratamento [24].

A degradação das hemiceluloses, em produtos voláteis, e a evaporação de extractivos são as principais razões para a redução da massa específica da madeira. Durante a modificação térmica há uma perda de humidade de aproximadamente 30% da massa, constituída pelos subprodutos, provenientes da degradação da madeira e da humidade contida na mesma. A degradação da hemicelulose também tem sido proposta como o principal factor para a perda de resistência mecânica da madeira, bem como a cristalinidade da celulose amorfa [11].

Dependendo da madeira utilizada, as propriedades mecânicas a temperaturas até 210°C permanecem geralmente com valores próximos dos originais. Já à temperatura de 230°C verificam-se decréscimos na resistência à flexão que podem chegar perto dos 40%, tornando-a mais frágil e quebradiça com a deterioração das propriedades de rotura devido à perda de polissacarídeos amorfos. Para o módulo de elasticidade o efeito é pequeno ou mesmo nulo. Em espécies de maior densidade, essa redução é mais acentuada, devido à tendência do tratamento térmico induzir a formação de fendas nas peças [11].

A parede das células da madeira é uma estrutura complexa formada por camadas de celulose, hemicelulose e lenhina e, em menor quantidade, por compostos orgânicos, sendo que, no tratamento térmico, as cadeias de moléculas dos polissacarídeos sofrem diferentes mudanças, dependendo do tipo de molécula e nível de temperatura. Em altas temperaturas, os grupos acetilas de hemicelulose reagem formando o ácido acético que divide as cadeias de celulose em pequenas partes e, ao mesmo tempo, o calor produz reacções de desidratação e oxidação na celulose e causa condensação da lenhina. Essas reacções geram combinações que alteram drasticamente as propriedades mecânicas e químicas da madeira [25].

A degradação da hemicelulose tem sido proposta como o principal factor para a perda da resistência mecânica da madeira, afectando especialmente a flexão e resistência à tracção, mas também a cristalização da celulose amorfa pode ter um importante papel. Já as reacções de policondensação da lenhina, resultando em ligações cruzadas têm um impacto positivo, principalmente nos esforços na direcção longitudinal da madeira. As diferenças entre a resistência à compressão paralela às fibras (aumento) e a compressão radial (redução), são atribuídas a anisotropia da celulose cristalina [11].

Em suma, as temperaturas elevadas utilizadas na modificação térmica alteram a composição química da madeira, produzindo um novo material com propriedades melhoradas em termos de durabilidade e pioradas ao nível de resistência mecânica.

A diminuição da humidade de equilíbrio deve-se à menor quantidade de água absorvida pelas paredes da célula em consequência da mudança química com uma diminuição de grupos hidroxilo mas também devido à diminuição da acessibilidade por aumento da cristalinidade da celulose e aumento das ligações cruzadas na lenhina que por sua vez levam a um aumento da estabilidade dimensional. O tratamento melhora a durabilidade de madeira, aumentando a resistência aos fungos, excepto em contacto com o solo, e ligeiramente a insectos, mas tem pouco efeito na resistência contra térmitas.

O ponto fraco do tratamento é, como vimos, a degradação de algumas propriedades mecânicas. O efeito no módulo de elasticidade é pequeno mas a diminuição da tensão de rotura pode ser significativa. A madeira torna-se mais quebradiça com a deterioração das propriedades de fractura devido à perda de polissacarídeos amorfos. A degradação das hemiceluloses é referida como o factor principal para a perda da resistência mecânica, mas o aumento da cristalinidade pode ter um papel importante [26].

Devido aos poucos testes realizados, recomenda-se que a madeira modificada por processos térmicos não seja utilizada para fins estruturais [27]. Atendendo ao que foi exposto sobre as alterações químicas

na estrutura celular da madeira corrobora-se que também a madeira proveniente de incêndio não seja utilizada em peças estruturais.

Como se refere no capítulo de introdução, procurou-se neste trabalho validar esta convicção através do estudo exaustivo de duas campanhas realizadas sobre amostras de madeira proveniente de incêndio. A descrição dessas duas campanhas experimentais constitui o objecto dos próximos dois capítulos.

3

CASO DE ESTUDO 1 – CAMPANHA EXPERIMENTAL 2009

3.1. OBJECTIVO

Este capítulo destina-se a completar a análise numérica e a interpretação dos resultados obtidos no trabalho experimental realizado por Samuel Pereira no ano lectivo de 2008/2009 na sua dissertação sob o tema “Avaliação Experimental das Principais Propriedades Mecânicas de Peças Estruturais em Madeira Antiga” para os ensaios à flexão.

O suporte teórico e conceitos aqui apresentados estão estreitamente ligados aos capítulos 4 e 5 da tese referida no parágrafo anterior, uma vez que foi a partir das metodologias e resultados obtidos nesse trabalho que se desenvolve o presente capítulo.

No referido trabalho não foi possível realizar todo o tratamento estatístico, avaliação e estudo dos resultados obtidos, nomeadamente na comparação entre os resultados obtidos para o lote global e os resultados obtidos para o sub-lote de amostras “Aprovadas”.

Dado ao facto do âmbito desta dissertação apenas se referir a madeira proveniente de incêndio, apenas se trataram os dados relativos ao lote de amostras de carvalho ensaiados à flexão, designado lote “G”.

A referida dissertação, disponível em página Web (<http://paginas.fe.up.pt/~jmfaria>), caracteriza de forma exaustiva as características do lote ensaiado pelo que se entende dispensar uma descrição detalhada.

Apresentam-se nos pontos seguintes um resumo dos resultados obtidos por Samuel Pereira para o lote global, o tratamento estatístico do sub-lote das amostras “Aprovadas” e uma avaliação sintética das principais situações dignas de registo.

3.2. CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO LOTE “G”

Na generalidade, o lote era composto por cinquenta e duas (52) vigas de Carvalho, com dimensões 0,06x0,10x1,90 m³ e a respeito das quais se sabia que eram oriundas de um palacete existente no concelho de Braga e que havia sofrido incêndio de grandes dimensões. As vigas apresentavam boa definição das arestas, em algumas vigas havia pontualmente falta de algum material, a integridade geral das vigas e o paralelismo ou ortogonalidade das faces (conforme o caso) eram características das amostras seleccionadas para a realização destes ensaios.



Fig.3.1 – Preparação das amostras do lote “G”. Esquerda: vigas de madeira ardida retiradas do palacete; Direita: aspecto final dos provetes “G”, (Pereira, 2009)

Este conjunto de vigas tomou a designação de “Grandes”, pelo que foram representadas pela letra “G_i”, sendo i, o número da viga a ensaiar. É de notar ainda que todas as faces foram identificadas e numeradas de um a seis (1 a 6) com a letra “F” colocada antes do respectivo número. Isto foi necessário porque tornou-se importante registar a presença de defeitos e em que face da viga estes se manifestavam, permitindo uma inspecção visual mais detalhada para validar a classificação proposta.

É de notar que algumas amostras, apesar de terem sido testadas, não contribuíram com os seus resultados para o registo final de valores porque os ensaios associados a estas amostras não foram considerados válidos. Os motivos que motivaram este facto vão desde a não colocação do LVDT (instrumento que mede os deslocamentos sofridos pelas amostras por aplicação crescente da carga) no local apropriado, até à curta duração do ensaio relativamente ao tempo mínimo estipulado pela norma que regula os ensaios em questão (EN 408 [29]).

3.2.2. CLASSIFICAÇÃO VISUAL

A tentativa de classificar visualmente peças estruturais de madeira antiga foi uma das bases que sustentou a realização da dissertação do Samuel Pereira. Trata-se de uma metodologia que exige rigor no detalhe e conhecimento a respeito da madeira (características intrínsecas, factores que afectam a resistência mecânica e outras particularidades importantes para o estudo estrutural da madeira) à entidade individual ou colectiva responsável pela inspecção visual.

Ao longo do processo de execução dos ensaios de flexão, procurou-se identificar, registar e descrever as características visuais mais marcantes dos provetes. Com base nestes elementos, e tendo presente os critérios de limitação de defeitos, definidos no “método Amorim Faria” (quadro 3.1), classificaram-se todas as amostras, que foram submetidas aos ensaios de flexão, numa das duas classes qualitativas propostas: *Aprovada* (caso a peça cumprisse os limites definidos) ou *Rejeitada* (caso excedesse os valores).

O método “Amorim Faria” consiste numa proposta de classificação visual de madeira antiga *in situ*. Para que este método seja possível de ser aplicado há que analisar alguns defeitos presentes na madeira que influenciam de forma decisiva na aprovação ou rejeição das vigas em estudo. Os defeitos que interferem no método são: diâmetro dos nós; comprimento do descaio; inclinação do fio; comprimento das fendas de secagem (repassadas ou não repassadas) e ainda a massa volúmica.

Quadro 3.1 – Método Amorim Faria: proposta de classificação visual *in situ* - Carvalho e Castanho (Franco, 2008)

Defeitos		- Categoria em obra -	
		APROVADA	
Diâmetro dos Nós		$10 < \varnothing \leq 40$ (mm)	
Descaio		$L_d < 33\%$ de L e $L_d < 100$ cm	
Inclinação do Fio		$i \leq 20\%$	
		$L_f \geq \min (L/4 ; 1 \text{ m})$	
Fendas profundas de secagem	Não repassadas	$f \leq 3/5$ (b ou h)	
	Repassadas	$a \geq \max (f_1, f_2)$ e /ou $(f_1 + f_2) \leq 2/3$ b	
Alterações biológicas		Caruncho - Admissível (se inactivo)	
		Fungos podridão - Admissíveis (se inactivos)	
Massa volúmica a 12% (Kg/m ³)	Carvalho	Castanho	
		≥ 640	
b	Espessura da peça	i	Inclinação do fio
h	altura da peça	d	Descaio
L	Comprimento da peça	f	Profundidade das fendas
\varnothing	Diâmetro dos nós	L _f	Comprimento das fendas

Tendo por base os critérios definidos no quadro acima apresentado, classificaram-se as cinquenta e duas amostras. Em cada uma delas, o trabalho começou com uma análise visual geral, tentando identificar a localização dos defeitos em todas as faces para de seguida, com o auxílio de uma fita métrica (para comprimentos na ordem das dezenas de centímetros) ou com uma régua de maior precisão (para dimensões que não alcançavam os dez centímetros), se efectuar a sua medição. Após esta inspecção realizou-se o registo fotográfico, evidenciando o aspecto da amostra e os defeitos contidos nas faces. Reunida toda a informação necessária, preencheu-se um quadro - tipo, utilizado para todas as amostras (apresentando-se no anexo A.1 um exemplo dessas fichas). Por último procedeu-se à comparação dos valores medidos com os valores definidos pelo método “Amorim Faria” e atribuição de uma classe qualitativa de acordo com as conclusões provenientes dessa comparação.



Fig.3.2 – Tipo de registo fotográfico realizado. Esquerda: pormenor de um defeito; Direita: vista geral de uma viga (Pereira, 2009)

Foi possível comparar a grandeza dos defeitos com os valores limitadores presentes no quadro 3.1 alusivos às peças de madeira de Castanho e de Carvalho. Com base nesta informação consegue-se rotular as peças com uma das duas classes (Aprovada ou Rejeitada) definidas pelo “método Amorim Faria” através de uma comparação entre o valor obtido por medição no local e o valor definido no quadro 3.1.

Quadro 3.2 – Classificação visual atribuída às amostras do lote “G”

Amostra	Classificação	Observações	Amostra	Classificação	Observações
G1	Rejeitada	Nó de grandes dimensões no local de aplicação da carga	G27	Aprovada	
G2	Rejeitada	Nó com d = 5 cm junto ao apoio do lado direito	G28	Aprovada	
G3	Aprovada		G29	Aprovada	
G4	Aprovada		G30	Rejeitada	conjunto de fendas na F4 e visíveis na F5 muito profundas
G5	Aprovada		G31	Aprovada	
G6	Aprovada		G32	Aprovada	
G7	Rejeitada	Fendas na face F1 e F4 condicionantes	G33	Aprovada	
G8	Aprovada		G34	Rejeitada	fenda na aresta de F4 e F1 com grande extensão e profunda
G9	Aprovada		G35	Aprovada	
G10	Aprovada		G36	Aprovada	
G11	Rejeitada	Fenda repassada (percorre a largura da F6 e tem extensão de 77 cm)	G37	Aprovada	
G12	Rejeitada	Zona do apoio direito muito afectada por nós e ataque biológico	G38	Aprovada	
G13	Aprovada		G39	Aprovada	
G14	Rejeitada	Conjunto de fendas não repassadas com extensão elevada	G40	Aprovada	
G15	Aprovada		G41	Aprovada	
G16	Aprovada		G42	Aprovada	
G17	Rejeitada	Nó grande a meio vão condicionante (d = 5 cm)	G43	Aprovada	
G18	Aprovada		G44	Aprovada	
G19	Aprovada		G45	Aprovada	
G20	Rejeitada	Muitos nós ao longo das faces; meio vão afectado por nós grandes	G46	Aprovada	
G21	Rejeitada	Fendas não repassadas ao longo de toda a face F1	G47	Aprovada	
G22	Rejeitada	nó grande junto ao apoio direito na F3	G48	Rejeitada	nó no apoio esquerdo condicionante
G23	Rejeitada	nós e fendas a afectar muito o apoio esquerdo	G49	Rejeitada	concentração de nós grandes e fendas importantes
G24	Aprovada		G50	Aprovada	
G25	Rejeitada	apoio direito com mau aspecto e afectado por nó de aresta grande (entre F1 e F2)	G51	Aprovada	
G26	Aprovada		G52	Aprovada	

Após a execução do ensaio mecânico de cada uma das cinquenta e duas (52) vigas testadas à flexão, comparou-se a classe qualitativa atribuída com o comportamento evidenciado durante o ensaio com o objectivo de validar a capacidade do observador e os critérios definidos pelo método de classificação visual. Esta comparação foi auxiliada pela visualização de filmes dos ensaios realizados.

3.2.3. AMOSTRAS “APROVADAS”

As amostras “Aprovadas” representam 69% da amostra total. Este valor revela-se satisfatório, dado que mais de metade da amostra reuniu condições de serem “Aprovadas”. Os defeitos que estavam presentes nas faces não foram significativos para se considerar a amostra rejeitada, ou seja, as dimensões dos defeitos estavam dentro dos limites impostos pelo método” Amorim Faria”. Assim das cinquenta e duas (52) amostras foram “Aprovadas” trinta e seis (36).

3.2.4. AMOSTRAS “REJEITADAS”

As amostras “Rejeitadas” foram dezasseis (16), representando 31% da amostra total. Os defeitos que mais contribuíram para a rejeição foram a presença de nós de grandes dimensões e a presença de fendas significativas, de acordo com o quadro atrás representado. Este baixo valor de rejeições prende-se com o facto das amostras na globalidade apresentarem boa integridade.

3.3. ENSAIOS À FLEXÃO – CONSIDERAÇÕES GERAIS

3.3.1. SETUP DE ENSAIO

Os ensaios de flexão realizados no âmbito desta campanha experimental fundamentam-se na norma EN 408 [29], nomeadamente nos pontos dez (10) e treze (13), que recomenda a utilização de provetes de tamanho real contendo defeitos, testando-os sobre condições normalizadas de temperatura e humidade relativa do ar.

Estes ensaios de flexão estática foram executados no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP e contaram com a colaboração de dois técnicos do laboratório na fase de preparação dos ensaios, na sua execução e na montagem dos dois esquemas de ensaio produzidos.

Os dois objectivos a atingir com a realização destes ensaios incluíam a determinação de duas propriedades mecânicas da madeira: a tensão de rotura à flexão na direcção do fio e o módulo de elasticidade global. Através da análise da curva força-deslocamento obtida experimentalmente foi possível determinar a rigidez e a capacidade resistente dos elementos, assim como conhecer o seu modo de rotura.

A norma europeia EN 408 [29] especifica métodos de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade em flexão e para a determinação da resistência à flexão de peças prismáticas de madeira. Estas duas propriedades são calculadas a partir de grandezas obtidas experimentalmente, recorrendo ao mesmo esquema de ensaio, ilustrado na norma na figura três (página onze do documento da EN 408 [29]). A figura seguinte é uma cópia do esquema apresentado na norma para a determinação das duas propriedades referidas e serviu de base à elaboração dos esquemas de ensaio para as vigas do lote “G”.

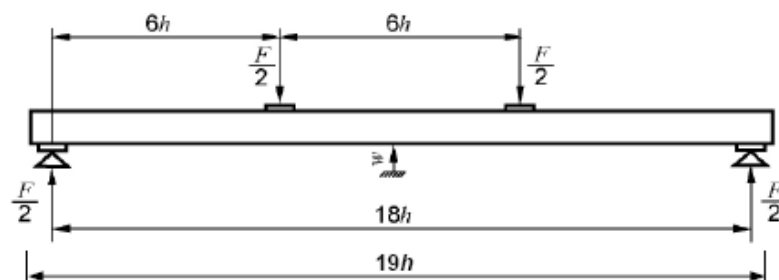


Fig.3.3 – Esquema de ensaio da norma EN 408

A norma europeia EN 408 [29] estabelece que a peça a ensaiar, simplesmente apoiada, deve ter normalmente um comprimento mínimo de dezanove vezes a altura da sua secção. Quando isto não for possível, quer por dificuldade em conseguir amostras com estas dimensões quer por incompatibilidade com o equipamento de ensaio, deve-se registar o vão da viga. Esta mesma norma estipula que a peça deve ser carregada simetricamente em flexão em dois pontos de um vão igual a dezoito vezes a altura da secção.

Refere ainda que, caso a peça e o equipamento não permitam que tais condições sejam perfeitamente atingidas, a distância entre os pontos de aplicação das forças e os apoios pode ser alterada de um valor não superior a 1,5 vezes a altura da secção da peça de madeira e que, por outro lado, o vão e o comprimento da peça podem ser alterados de um valor não superior a três vezes aquela altura, sem prejudicar o ensaio, prevendo assim uma relação vão/altura de $L/h = 18 \pm 3$.



Fig.3.4 – Esquema real de ensaio. (Pereira, 2009)

Os ensaios à flexão envolveram o lote de amostras apresentadas no ponto 3.1, sendo o disposto na norma cumprido já que as vigas possuem o comprimento mínimo estabelecido, o que se traduz mais concretamente, em um metro e noventa centímetros (com $L_{min}=19 \times 0,10=1,90$ m). Por outro lado, as peças foram carregadas de acordo com o esquema exibido na Figura 3.4, existindo um vão igual a dezoito vezes a altura da secção. Para o lote “G”, o vão correspondente tinha um comprimento de um metro e oitenta centímetros.

Resumidamente, o ensaio consistiu na aplicação de duas cargas pontuais simétricas, aos terços de um provete de madeira simplesmente apoiado e com comprimento igual a dezanove vezes a sua altura (19h). Na figura 3.6 é possível observar o esquema de ensaio à flexão dos provetes de tamanho real realizado no LESE, mostrando as vigas do lote “G”.

Para conseguir que as vigas ensaiadas fossem ensaiadas segundo o esquema fixado na norma, ou seja, exibindo uma configuração de viga simplesmente apoiada, materializaram-se os apoios simples através de perfis metálicos com a forma de meio cilindro (identificam-se pela coloração amarela na Figura 3.5) e que permitem a livre rotação no plano do ensaio.



Fig.3.5 – Pormenor da zona de apoio (Pereira, 2009)

A transmissão de cargas à viga a ensaiar foi realizada por um único actuador hidráulico com uma célula de carga de 100 KN ligado a uma estrutura metálica de reacção. O actuador é controlado através de um sistema electrónico, que também é usado para a aquisição de dados relativos ao ensaio e manuseado pelo operador. A carga total é distribuída por dois pontos de aplicação com o auxílio de um perfil metálico tubular (tubo com secção quadrada e oca) colocado sobre o provete, apoiando-se neste por dois perfis pequenos idênticos aos que serviram para materializar os apoios simples.

A amostra a ensaiar assenta sobre uma estrutura metálica com peças amovíveis capazes de proporcionar diferentes vãos à configuração, conforme as dimensões da peça.

A medição do deslocamento foi realizada por um transdutor de deslocamentos do tipo LVDT colocado a meio vão da amostra em ensaio com o referencial alojado na parte metálica do equipamento de teste

pois era pousado na base deste. O extensómetro encontrava-se agarrado à peça de madeira através de um perfil que era colocado à volta da amostra e fixado a esta com o auxílio de um parafuso, tal como mostra a Figura 3.6 - esquerda. As medições lidas pelo extensómetro são recolhidas pelo sistema electrónico de aquisição de dados referido anteriormente.

Entre o actuador hidráulico, que proporciona a transmissão de cargas à amostra, e o perfil metálico, que ajuda à divisão da carga em duas forças equivalentes, foi colocada uma folha de chumbo com o objectivo de permitir uma melhor transmissão de carga devido ao ajustamento mais perfeito que proporcionou entre a peça metálica rígida (tubo) e o provete.

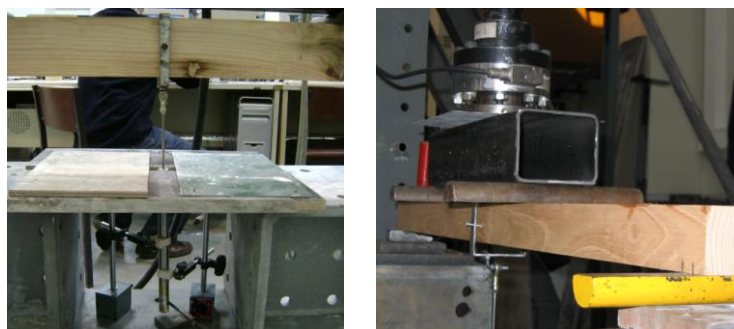


Fig.3.6 – Pormenores do esquema de ensaio. Esquerda: ligação do transdutor à peça. Direita: zona de carregamento (Pereira, 2009)

3.3.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

A realização dos ensaios de flexão iniciou-se com a preparação das vigas, compreendendo as tarefas de identificação, inspecção visual, determinação da massa e do volume das mesmas.

A parte de execução dos ensaios mecânicos exigiu a colocação dos provetes sobre os apoios, orientados de modo a que a força fosse aplicada segundo a direcção tangencial da madeira, procurando-se também que o seu eixo ficasse perpendicular aos eixos dos apoios e que a sua secção média ficasse igualmente distanciada destes. Com o provete devidamente colocado procedeu-se à aplicação do transdutor de deslocamentos no dispositivo de amarração ao provete, executando-se de seguida o ajuste do actuador hidráulico ao perfil metálico até contactar com a sua face e consequentemente imobilizar a folha de chumbo utilizada no ajuste.

O processo de aplicação gradual de forças à viga inicia-se quando o ajuste se dá como concluído, a um ritmo constante até se atingir a sua rotura dentro do tempo estipulado pela norma EN 408 [29]: (300 ± 120) segundos. Para isto foi necessário definir uma velocidade constante de aplicação de carga que permitisse atingir a força máxima que a viga consegue sustentar dentro do limite temporal definido: a velocidade de ensaio foi igual 0,1mm/s. A força de rotura obtida corresponde à força máxima aplicada durante o ensaio e a flecha de rotura corresponde ao deslocamento verificado nesse instante.



Fig.3.7 – Amostras submetidas ao ensaio de flexão (Pereira, 2009)

Os ensaios foram prolongados para além da carga máxima, exceptuando aqueles em que a rotura foi muito frágil, não existindo porém um critério rigoroso para serem considerados como concluídos. Normalmente fazia-se uma rápida análise do gráfico fornecido instantaneamente pelo equipamento de leitura de dados e tentava-se perceber se o comportamento da amostra tinha estabilizado, não evidenciando uma recuperação da carga sustida e limitando-se a sofrer deslocamentos sucessivamente maiores.

No final de cada ensaio registaram-se todos os detalhes do comportamento da viga ensaiada que se acharam relevantes e merecedores de serem assinalados. No ponto 3.6.5 confrontar-se-á a classe atribuída com o comportamento evidenciado no decorrer do ensaio. Isto permitirá no fundo validar ou porventura criticar os limites impostos e o tipo de preceitos escolhidos com vista à classificação de madeiras antigas com base na inspecção visual.

3.3.3. PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS A REGISTAR

A madeira, pela sua natureza heterogênea, não apresenta roturas idênticas mesmo sendo submetida ao mesmo tipo de solicitação. A forma de rotura depende do tipo de madeira e das suas características particulares, mas conseguiu-se verificar uma rotura típica que englobava um rompimento no lado oposto da aplicação da carga (lado condicionado por tracção), geralmente com uma fissura muito prolongada ao longo do comprimento da peça acompanhando a linha neutra (figura 3.8). No lado oposto, o lado em que a carga é aplicada (sujeito à compressão) manifesta deformação plástica sob a forma de esmagamento.



Fig.3.8 – Fissura prolongada ao longo da peça (Pereira, 2009)



Fig.3.9 – Rompimento na zona traccionada (Pereira, 2009)

As figuras anteriores (figuras 3.8 e 3.9) evidenciam a tipologia de fissuras descritas. Resumidamente, ocorre na zona comprimida uma pré-rotura localizada, caso o limite de resistência à compressão seja ultrapassado acabando por, no fim, as peças romperem por rotura e estilhaçamento das fibras de extradorso, quando a tensão resistente máxima à tracção é ultrapassada.

Nos ensaios realizados sobre as vigas presenciaram-se algumas roturas muito frágeis, sem qualquer tipo de aviso prévio e caracterizadas por alguma violência no momento da rotura. Estas roturas podem ser definidas em traços gerais por um corte brusco na zona de aplicação da carga (geralmente), sem que esta tenha atingido valores muito elevados (em alguns casos, o valor da carga e rotura não ultrapassou os 5kN correspondentes a 15,1MPa de tensão de rotura à flexão). Como é expectável, o mecanismo de rotura definido anteriormente não caracteriza o que se passou nestes casos, considerados como excepções perigosas do comportamento usual das vigas e que ocorreram exclusivamente em peças integrantes do lote de madeira ardida.



Fig.3.10 – Rotura por corte (Pereira, 2009)

3.4. LOTE COMPLETO – RESULTADOS

3.4.1. MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica constitui uma das propriedades físicas mais importantes da madeira, pois dela dependem a maior parte das suas propriedades, servindo na prática como referência para a classificação da madeira. Como seria de esperar face à grande variabilidade existente na estrutura interior do lenho, cada espécie exhibe uma massa volúmica característica. Contudo dentro de uma mesma espécie surgem variações mais ou menos significativas à volta do valor desta massa volúmica característica.

Esta grandeza é calculada pelo quociente entre a massa da amostra e o respectivo volume, expresso em Kg/m^3 . Por um lado, obteve-se a massa do provete de madeira por pesagem, usando uma balança digital (fornecendo valores em quilogramas com quatro casas decimais), enquanto o volume foi determinado por medição das suas arestas recorrendo a uma fita métrica.

O valor da massa volúmica constitui um dos parâmetros de classificação da proposta de inspecção visual apresentada, com valores limite especificados para a espécie botânica em questão. Neste sentido, os resultados obtidos na determinação da massa volúmica para estas amostras permitem aprová-las ou rejeitá-las caso o valor calculado fosse respectivamente superior ou inferior ao valor limite fixado, e igual a 600 kg/m^3 .

A determinação da massa volúmica consistiu na medição e pesagem dos provetes. Dadas as dimensões das amostras do lote “G”, a massa volúmica foi calculada apenas para metade do número total de amostras do lote, uma vez que o seu manuseamento e transporte do local de ensaio para o local de pesagem eram algo difíceis.



Fig.3.11 – Pesagem de vigas (Pereira, 2009)

Apresenta-se de seguida o quadro que traduz os resultados das pesagens e das medições, com o respectivo cálculo da massa volúmica, para as vigas em estudo.

Quadro 3.3 – Massa volúmica de amostras do lote “G”

Amostra	b (m)	h (m)	L (m)	m (kg)	ρ (kg/m ³)
G2	0,06	0,10	1,89	6,3606	560,9
G3	0,06	0,10	1,89	7,0138	618,5
G4	0,06	0,10	1,89	6,2502	551,2
G5	0,06	0,10	1,89	6,7345	593,9
G6	0,06	0,10	1,89	7,1501	630,5
G7	0,06	0,10	1,89	7,2439	638,8
G8	0,06	0,10	1,89	6,4978	573,0
G9	0,06	0,10	1,89	6,3490	559,9
G10	0,06	0,10	1,89	6,1164	539,4
G11	0,06	0,10	1,89	6,0216	531,0
G12	0,06	0,10	1,89	6,4905	572,4
G13	0,06	0,10	1,89	6,6592	587,2
G14	0,06	0,10	1,89	7,5023	661,6
G15	0,06	0,10	1,89	6,7971	599,4
G16	0,06	0,10	1,89	7,1625	631,6
G17	0,06	0,10	1,89	7,1668	632,0
G18	0,06	0,10	1,89	5,9726	526,7
G19	0,06	0,10	1,89	6,9664	614,3
G20	0,06	0,10	1,89	6,1891	545,8
G21	0,06	0,10	1,89	7,0125	618,4
G22	0,06	0,10	1,89	6,8319	602,5
G23	0,06	0,10	1,89	7,0295	619,9
G24	0,06	0,10	1,89	7,6380	673,5
G25	0,06	0,10	1,89	6,9336	611,4
G26	0,06	0,10	1,89	7,4395	656,0

As vigas apresentam secções transversais com dimensões regulares entre elas, motivadas pelo bom corte. Por outro lado o comprimento difere do desejado em um centímetro (o comprimento idealizado para as vigas seria de um metro e noventa centímetros), não causando contudo problemas na materialização do esquema de ensaio. Na realidade, as amostras evidenciavam diferenças de poucos milímetros no comprimento registado mas optou-se por considerá-lo idêntico em todas elas, já que isto não representa uma variação significativa entre o valor determinado e o valor real da massa volúmica.

Determinou-se a média da massa volúmica com o objectivo de se efectuar uma ligeira comparação com os valores sugeridos na proposta de classificação visual e também se procurou avaliar a variabilidade apresentada pelos conjuntos determinando o desvio padrão. Convém não esquecer que a massa volúmica foi calculada com o objectivo de classificar qualitativamente as vigas numa das duas classes sugeridas pela proposta (*Aprovada* ou *Rejeitada*), servindo-se para esse efeito dos valores obtidos para cada uma das vigas elementares.

Face aos dados recolhidos junto das vinte e cinco (25) amostras, chegou-se a um valor médio para o conjunto de $598,0 \text{ kg/m}^3$. Conforme já referido e pelos motivos anteriormente enunciados, apesar de este valor não representar o conjunto total das amostras ensaiadas, pode-se afirmar que constitui uma boa aproximação já que foi calculado com base em quarenta e oito por cento (48%) do número total de amostras do lote. O conjunto revela ainda uma homogeneidade considerável já que o coeficiente de variação determinado atinge apenas um valor de sete por cento (7%), ou seja, o desvio padrão é apenas sete por cento do valor médio calculado para o conjunto de amostras pesadas.

Quadro 3.4 – Valores estatísticos para a massa volúmica do lote “G”

Média	Desvio padrão	Coeficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
ρ_m	σ	CV	ρ_k	$\rho_{m\max}$	$\rho_{m\min}$
(Kg/m^3)	(Kg/m^3)	(%)	(Kg/m^3)	(Kg/m^3)	(Kg/m^3)
598,0	41,9	7,0	529,3	673,5	526,7

A figura 3.12 traduz a representação gráfica do parâmetro massa volúmica para as amostras avaliadas. As barras a vermelho correspondem a amostras “Rejeitadas” e as barras a preto a amostras “Aprovadas”.

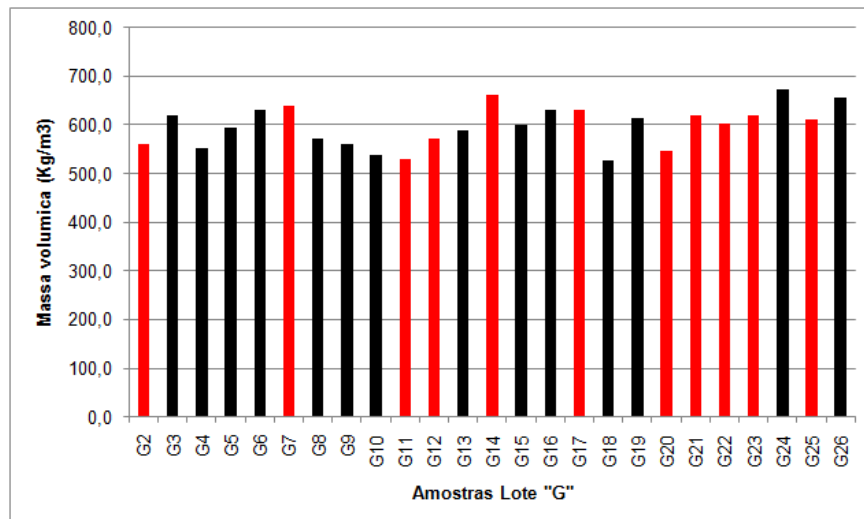


Fig.3.12 – Massa volúmica das amostras do lote “G”

3.4.2. DIAGRAMAS DE ENSAIO

Os ensaios realizados sobre as vigas, neste caso sobre o conjunto de cinquenta e duas (52) vigas, permitiram o registo dos valores da força máxima de rotura e dos deslocamentos observados a meio vão (flecha para a carga máxima). A partir destes resultados directos do ensaio, foi possível determinar o valor da resistência à flexão e assim proceder posteriormente à comparação com o valor estimado na proposta da classificação visual.

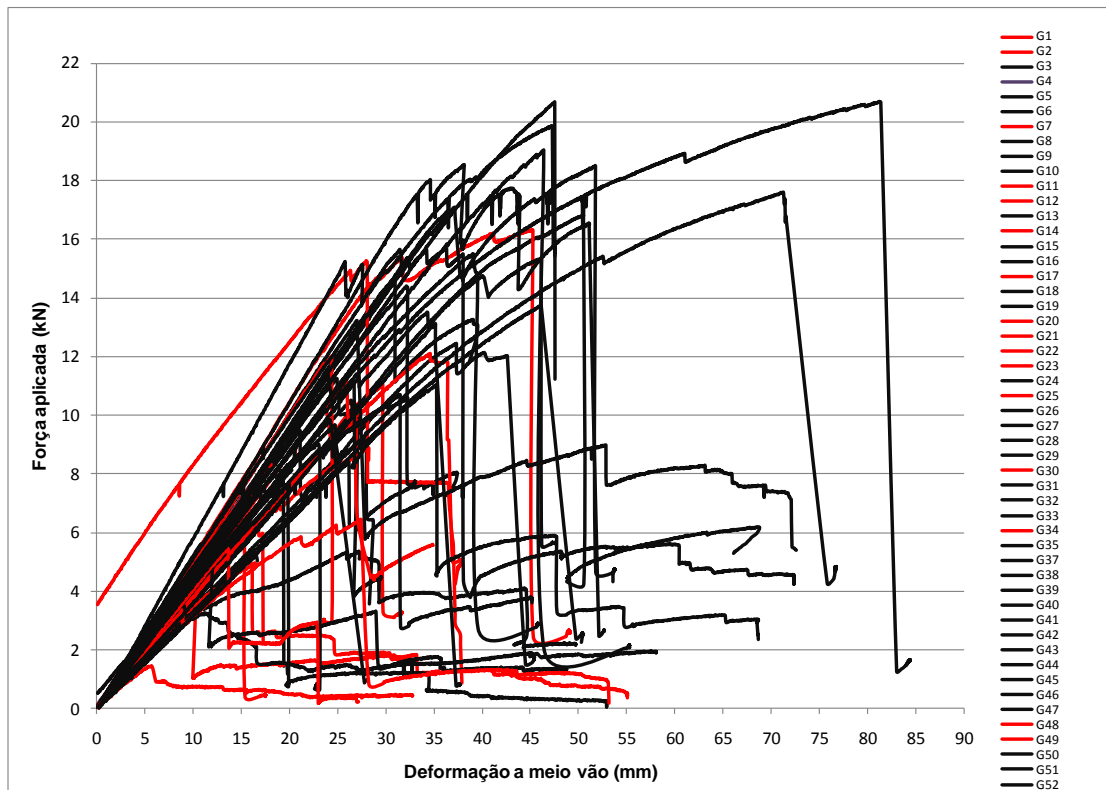


Fig.3.13 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento a meio vão - Lote "G"

3.4.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Após se terem ensaiado os provetes à flexão, levando-os à rotura e registando depois disto os valores de força máxima aplicada, conseguiu-se a partir deles determinar os valores das tensões de rotura à flexão, também designada por resistência à flexão (f_m). A norma NP EN 408 [29] mostra no seu ponto 13.3 a expressão que relaciona a força máxima obtida experimentalmente com a resistência à flexão e que se transcreveu para este texto:

$$f_m = \frac{a \cdot F_{m\acute{a}x}}{2 \cdot W} \quad (3.1)$$

Sendo que as variáveis contidas na expressão apresentam o seguinte significado:

f_m - Resistência à flexão (MPa)

a – distância entre a posição de uma força e o apoio mais próximo, em milímetros (mm);

$F_{m\acute{a}x}$ – força máxima, em Newton (N);

W – módulo de flexão da secção, em milímetros cúbicos (mm³);

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (3.2)$$

b – largura da secção transversal da viga ensaiada, em milímetros (mm);

h – altura da secção transversal da viga ensaiada, em milímetros (mm).

Dado que a largura (b) e a altura (h) das amostras é fixa, a determinação da resistência à flexão é de cálculo directo, pelo que apenas varia com o valor da força F.

Através da expressão 3.1 determinou-se assim a resistência à flexão dos provetes ensaiados, estando os valores obtidos resumidos no quadro 3.5.

Pela expressão citada, percebe-se que a tensão máxima de rotura à flexão é directamente proporcional à força máxima aplicada já que os valores da distância entre a posição de uma força e o apoio mais próximo (designada por “a”) e os valores do módulo de flexão (W) são iguais dentro de cada conjunto. Por este motivo, as razões apontadas para a variabilidade de resultados referentes à força máxima, nomeadamente a quantidade e localização de defeitos, são perfeitamente válidos para justificar a grande variação de valores apresentada pela resistência à flexão.

Quadro 3.5 – Resultados dos Ensaio à Flexão do Lote “G”

Amostra	F _{máxima} (kN)	Deslocamento a meio vão (mm)	σ flexão (MPa)	Eflexão (MPa)
G1	5,0	15,8	15,1	7,8
G2	11,1	29,7	33,2	10,0
G3	10,5	26,4	31,5	9,8
G4	10,1	21,8	30,2	11,3
G5	9,5	21,1	28,5	10,8
G6	14,7	31,0	44,1	11,1
G7	8,9	28,2	26,7	9,2
G8	11,2	24,9	33,7	10,5
G9	16,8	50,5	50,5	8,8
G10	7,7	19,4	23,2	9,1
G11	6,1	16,8	18,3	8,8
G12	6,3	15,3	18,9	10,0
G13	12,4	37,4	37,3	8,6
G14	16,3	45,3	49,0	11,9
G15	19,9	47,3	59,7	11,6
G16	5,6	10,8	16,9	11,6
G17	12,1	34,6	36,3	9,9
G18	5,2	16,5	15,6	7,3
G19	18,5	51,8	55,5	10,8
G20	15,3	27,9	45,8	11,7
G21	12,0	24,4	36,0	11,4
G22	1,5	5,7	4,4	6,8
G23	4,3	10,4	12,9	8,9
G24	15,7	36,2	47,1	13,4
G25	9,9	26,9	29,6	8,8
G26	20,7	47,6	62,1	10,6

Amostra	F _{máxima} (kN)	Deslocamento a meio vão (mm)	σ flexão (MPa)	Eflexão (MPa)
G27	9,9	24,2	29,6	9,6
G28	18,6	38,2	55,7	12,0
G29	10,6	32,3	31,8	9,8
G30	8,4	18,1	25,1	11,4
G31	7,6	19,8	22,7	9,4
G32	17,6	71,3	52,8	7,8
G33	11,4	24,0	34,2	11,0
G34	5,0	16,4	14,9	8,1
G35	5,6	12,0	16,7	10,7
G37	10,7	31,5	32,1	9,3
G38	13,2	27,0	39,7	11,9
G39	17,0	36,5	51,0	10,9
G40	13,8	46,2	41,3	7,6
G41	9,0	22,9	27,1	10,8
G42	15,5	39,0	46,5	10,3
G43	14,4	32,1	43,2	11,1
G44	3,6	8,6	10,7	11,6
G45	20,7	81,3	62,1	10,0
G46	19,0	46,4	57,1	10,1
G47	15,3	46,0	46,0	9,5
G48	5,5	13,5	16,5	9,4
G49	6,5	27,4	19,4	8,8
G50	13,1	35,2	39,4	8,5
G51	8,2	20,2	24,5	9,9
G52	8,4	26,1	25,2	7,3

O objectivo passa pela validação da proposta de classificação visual, no que refere ao valor da resistência característica apresentado. Para isto surgiu a necessidade de determinar valores característicos e comprovar a existência de uma margem de segurança entre eles e o mínimo definido na proposta de classificação visual de madeira antiga.

Todos os ensaios realizados e que foram considerados válidos, isto é, ensaios sobre os quais se conseguiu obter valores, constituíram a base para o tratamento estatístico.

Conforme se constata no quadro 3.6, o lote ensaiado apresenta-se com um elevado coeficiente de variação, já que o desvio padrão representa 31,5% do valor médio ($f_{m,0}$ igual a 47,1MPa) da

amostragem. Isto leva-nos a afirmar que se trata de um lote com elevada dispersão de resultados, evidenciando valores muito distintos, o que indicia que seja particularmente perigoso para a utilização da madeira proveniente de incêndio como elemento estrutural, uma vez que estamos a falar de um conjunto com cinquenta e duas (52) amostras, o que é uma dimensão considerável.

O conjunto pode ser caracterizado por uma resistência característica à flexão de 22,8MPa, o que corresponde a um valor ligeiramente superior ao definido na proposta de classificação (21MPa).

Quadro 3.6 – Valores característicos da resistência à flexão - lote “G”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$f_{m,0}$	σ	CV	$f_{m,0,k}$	$f_m \text{ máx}$	$f_m \text{ min}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
47,1	14,8	31,5	22,8	62,1	4,4

Na figura 3.14 ilustra-se a relação entre a resistência à flexão e a classificação visual realizada previamente aos ensaios mecânicos para o lote das vigas “G”. Uma vez mais, a preto encontram-se representadas as vigas “Aprovadas” e a vermelho as vigas “Rejeitadas”.

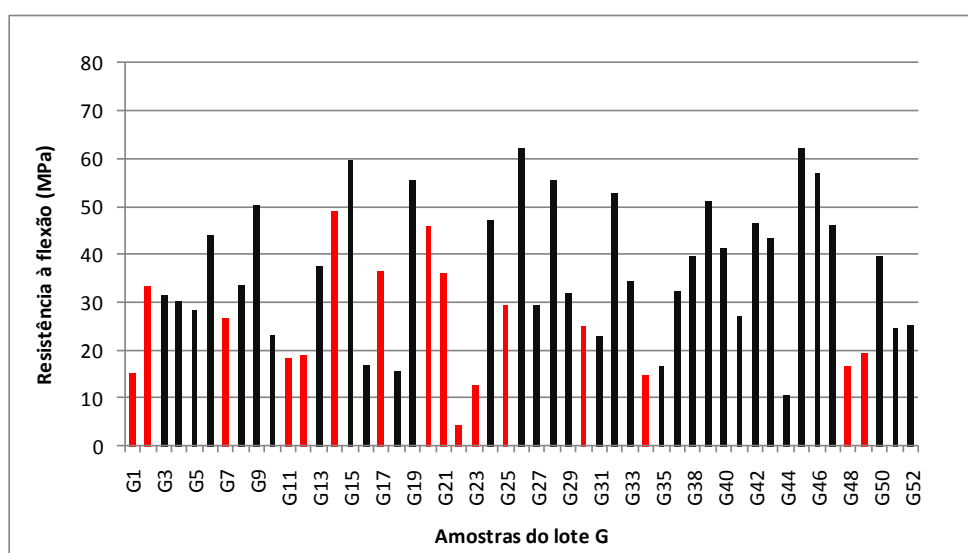


Fig.3.14 – Resistência à flexão ($f_{m,k}$) - Lote “G”

3.4.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade à flexão estática na direcção do fio é uma propriedade muito importante na análise estrutural, constituindo-se como um indicador ou medida de flexibilidade ou rigidez de um material.

Para um dado material, ao olhar para um conjunto de resultados obtidos experimentalmente consegue-se dizer que esse material é frágil, caso a rotura ocorra ao atingir o limite de proporcionalidade entre força e deslocamento, sem se denotar a presença de deformações que fizessem prever essa situação. Esta informação é importante para o cálculo de estruturas já que o módulo de elasticidade é essencial para calcular deformações e é um parâmetro essencial na quantificação dos esforços em muitas situações.

A determinação do módulo de elasticidade à flexão seguiu os critérios gerais definidos na EN 408 [29], ponto 10, calculando o que é definido na norma como módulo de elasticidade global em flexão e que será daqui em diante referido como módulo de elasticidade em flexão. O procedimento de ensaio realizado foi o descrito para o cálculo da resistência à flexão já que as duas grandezas (módulo de elasticidade e resistência à flexão) basearam a sua determinação no mesmo conjunto de valores obtido a partir de um único ensaio (para cada amostra). Teve-se atenção às indicações sugeridas na norma principalmente no que refere à velocidade de ensaio e ao facto de não se dever considerar valores acima de 40% da Força máxima.

O módulo de elasticidade em flexão foi determinado recorrendo à seguinte expressão, presente na norma NP EN 408 [29]:

$$E_{m,g} = \frac{l^3 (F_2 - F_1)}{bh^3 (w_2 - w_1)} \left[\left(\frac{3a}{4l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad (3.3)$$

Sendo que as variáveis contidas na expressão apresentam o seguinte significado:

$F_2 - F_1$: é um incremento de força na porção recta da curva força-deformação, em Newton (N);

$w_2 - w_1$: é o incremento de deformação correspondente a $F_2 - F_1$, em milímetros (mm);

a : distância entre a posição de uma força e o apoio mais próximo, em milímetros (mm);

l : vão em flexão, em milímetros (mm);

b : largura da secção transversal num ensaio de flexão, em milímetros (mm);

h : altura da secção transversal num ensaio de flexão, em milímetros (mm);

O parâmetro da equação que traduz o incremento de força sobre o incremento de deformação pode ser obtido graficamente a partir de uma regressão linear, desde que, segundo a EN 408 [29], o quadrado do coeficiente de correlação linear obtido seja superior a 0,99. O valor proposto na norma é um valor muito exigente e por isso aceitaram-se quadrados dos coeficientes de correlação linear superiores a 0,95, condição satisfeita por todos os ensaios.

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade do lote “G” podem ser consultados no quadro 3.5

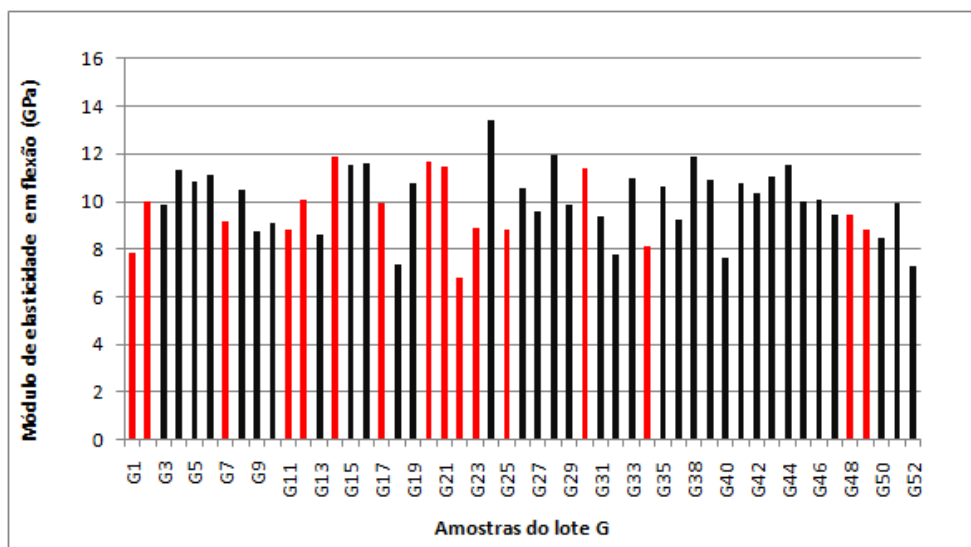


Fig.3.15 – Módulo de Elasticidade em flexão – Lote “G”

Quadro 3.7 – Valores característicos do módulo de elasticidade em flexão - lote “G”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
E_{mean}	σ	CV	E_k	$E_{máx}$	$E_{mín}$
(GPa)	(GPa)	(%)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
9,9	1,4	14,4	7,6	13,4	6,8

A variabilidade exibida por este lote para o módulo de elasticidade não é tão marcante como a exibida para o caso da resistência à flexão, já que neste caso o coeficiente de variação cifra-se num valor de 14,4% enquanto no caso referido ultrapassou os 30%. Esta afirmação tem de ser avaliada para o sub-lote das amostras “Aprovadas” para ser possível perceber esta grande diferença. Os defeitos têm influência superior na resistência à flexão.

A proposta de classificação visual apresenta, para a espécie de Carvalho o valor mínimo de 8,0 GPa para o Módulo de Elasticidade médio (E_{mean}). Como se pode constatar, o valor médio calculado é superior ao disposto na proposta e com margem considerável, o que constitui uma validação do valor proposto no método “Amorim Faria”.

O quadro 3.5 atrás apresentado resume os resultados obtidos juntando num mesmo quadro a resistência à flexão e módulo de elasticidade.

3.5 LOTE DE AMOSTRAS “APROVADAS” – RESULTADOS

3.5.1. MASSA VOLÚMICA

Neste ponto apresentam-se os resultados para a massa volúmica das amostras que apresentaram condições de serem “Aprovadas” mediante o método “Amorim Faria”. Das vinte e cinco amostras que constituíam a amostra do lote completo, aprovaram-se catorze vigas. Considerando os valores apresentados no quadro 3.4 eliminaram-se os onze valores referentes às vigas “Rejeitadas” e procedeu-se ao seu tratamento estatístico. No quadro 3.8 apresenta-se o valor da massa volúmica para as amostras “Aprovadas” e na figura 3.16 a representação gráfica de tais valores.

Quadro 3.8 – Massa Volúmica das Amostras “Aprovadas”

vigas aprovadas	b(m)	h(m)	L(m)	m(kg)	$\rho(\text{kg/m}^3)$
G3	0,06	0,1	1,89	7,014	618,5
G4	0,06	0,1	1,89	6,250	551,2
G5	0,06	0,1	1,89	6,735	593,9
G6	0,06	0,1	1,89	7,150	630,5
G8	0,06	0,1	1,89	6,498	573,0
G9	0,06	0,1	1,89	6,349	559,9
G10	0,06	0,1	1,89	6,116	539,4
G13	0,06	0,1	1,89	6,659	587,2
G15	0,06	0,1	1,89	6,797	599,4
G16	0,06	0,1	1,89	7,163	631,6
G18	0,06	0,1	1,89	5,973	526,7
G19	0,06	0,1	1,89	6,966	614,3
G24	0,06	0,1	1,89	7,638	673,5
G26	0,06	0,1	1,89	7,440	656,0

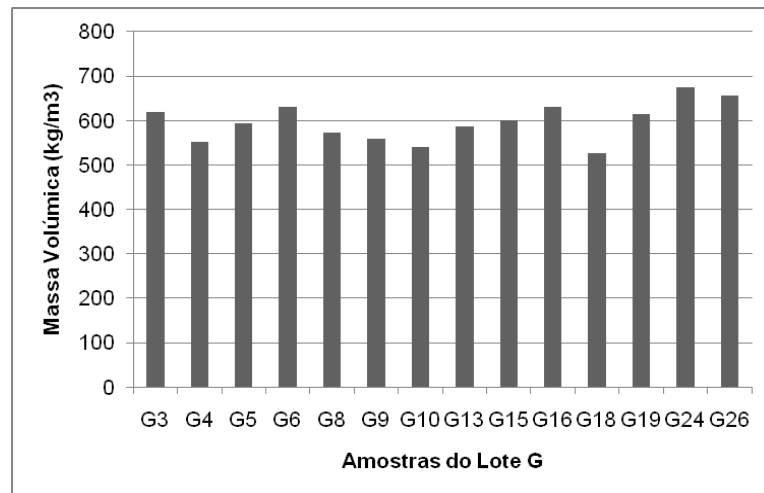


Fig.3.16 – Massa Volúmica das Amostras “Aprovadas”

Com os resultados presentes no quadro 3.8, efectuou-se um conjunto de operações das quais resultaram os valores que permitem caracterizar e relacionar a amostra com a classificação visual dada inicialmente. Para esta sub-amostra de “Aprovadas”, consultando o quadro 3.9 verifica-se um valor médio para a massa volúmica de 596.8 kg/m^3 e uma variação de 7,3%, isto significa que face aos valores obtidos para o lote completo, na sub-amostra, o valor médio da massa volúmica desce $1,2 \text{ kg/m}^3$ e o valor da variação aumenta em três décimas.

O valor médio (ρ_m igual a $596,8 \text{ Kg/m}^3$) fica um pouco abaixo do valor recomendado pelo método “Amorim Faria” que é de 600 Kg/m^3 . No entanto a amostra continua a apresentar uma boa homogeneidade dado as grandezas serem semelhantes aos obtidos para o lote completo, designadamente o desvio padrão.

Quadro 3.9 – Valores Estatísticos para a Massa Volúmica das Amostras “Aprovadas”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
ρ_m	σ	CV	ρ_k	$\rho_{\text{máx}}$	$\rho_{\text{mín}}$
(kg/m³)	(kg/m³)	(%)	(kg/m³)	(kg/m³)	(kg/m³)
596,8	43,7	7,3	525,1	673,5	526,7

3.5.2. DIAGRAMAS DE ENSAIO

A figura 3.17 apresenta graficamente a “nuvem” de resultados referentes aos ensaios realizados sobre os provetes aprovados. Regista-se desde já a elevada variabilidade de resultados traduzindo uma grande gama de valores atingidos.

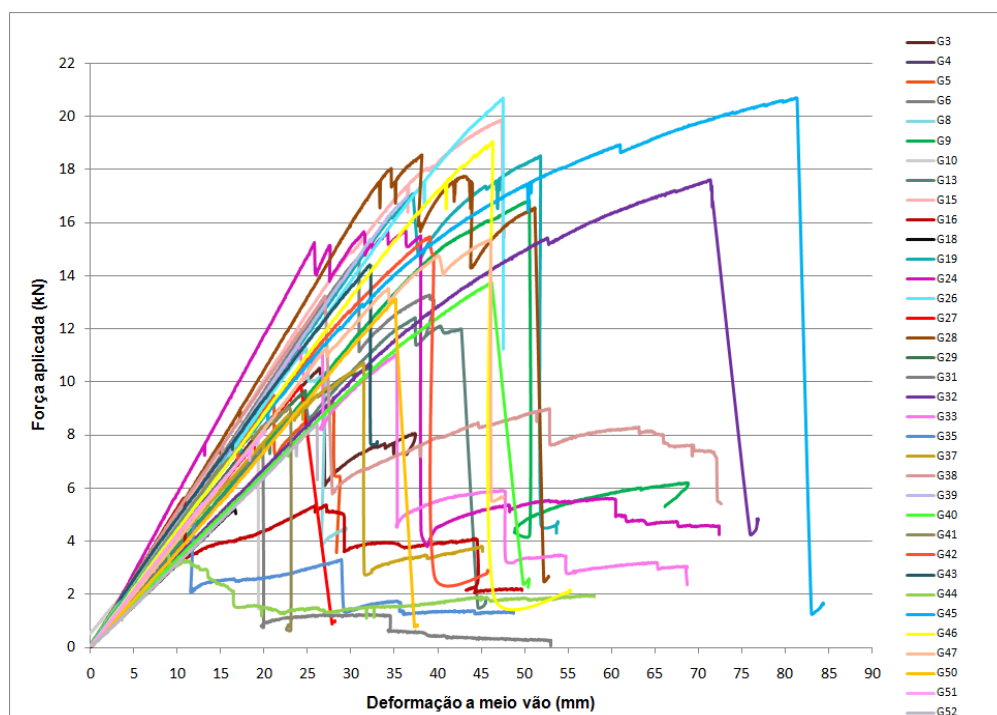


Fig.3.17 – Conjunto de respostas Força vs Deslocamento a meio vão - Lote “Aprovadas”

3.5.3.RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O conjunto de vigas “Aprovadas” perfaz um total de 69% do total de amostras. Tal como no ponto 3.4.3, o estudo da tensão de flexão deste sub-lote revela-se de extrema importância, uma vez que os valores característicos de tensão de flexão obtidos neste ponto permitem a validação da proposta de classificação visual efectuada.

No quadro 3.10 e na figura 3.18 apresentam-se os valores de tensão obtidos para as vigas “Aprovadas” e a respectiva representação gráfica, que torna mais elucidativos os valores de tensão para cada viga.

Quadro 3.10 – Tensão de Flexão e módulo de Flexão das Amostras “Aprovadas”

Vigas Aprovadas	Força Máxima (KN)	Deslocamento 1/2 vão (mm)	σ flexão (MPa)	Eflexão (GPa)	Vigas Aprovadas	Força Máxima (KN)	Deslocamento 1/2 vão (mm)	σ flexão (MPa)	Eflexão (GPa)
G3	10,5	26,4	31,5	9,8	G32	17,6	71,3	52,8	7,8
G4	10,1	21,8	30,2	11,3	G33	11,4	24,0	34,2	11,0
G5	9,5	21,1	28,5	10,8	G35	5,6	12,0	16,7	10,7
G6	14,7	31,0	44,1	11,1	G37	10,7	31,5	32,1	9,3
G8	11,2	24,9	33,7	10,5	G38	13,2	27,0	39,7	11,9
G9	16,8	50,5	50,5	8,8	G39	17,0	36,5	51,0	10,9
G10	7,7	19,4	23,2	9,1	G40	13,8	46,2	41,3	7,6
G13	12,4	37,4	37,3	8,6	G41	9,0	22,9	27,1	10,8
G15	19,9	47,3	59,7	11,6	G42	15,5	39,0	46,5	10,3
G16	5,6	10,8	16,9	11,6	G43	14,4	32,1	43,2	11,1
G18	5,2	16,5	15,6	7,3	G44	3,6	8,6	10,7	11,6
G19	18,5	51,8	55,5	10,8	G45	20,7	81,3	62,1	10,0
G24	15,7	36,2	47,1	13,4	G46	19,0	46,4	57,1	10,1
G26	20,7	47,6	62,1	10,6	G47	15,3	46,0	46,0	9,5
G27	9,9	24,2	29,6	9,6	G50	13,1	35,2	39,4	8,5
G28	18,6	38,2	55,7	12,0	G51	8,2	20,2	24,5	9,9
G29	10,6	32,3	31,8	9,8	G52	8,4	26,1	25,2	7,3
G31	7,6	19,8	22,7	9,4					

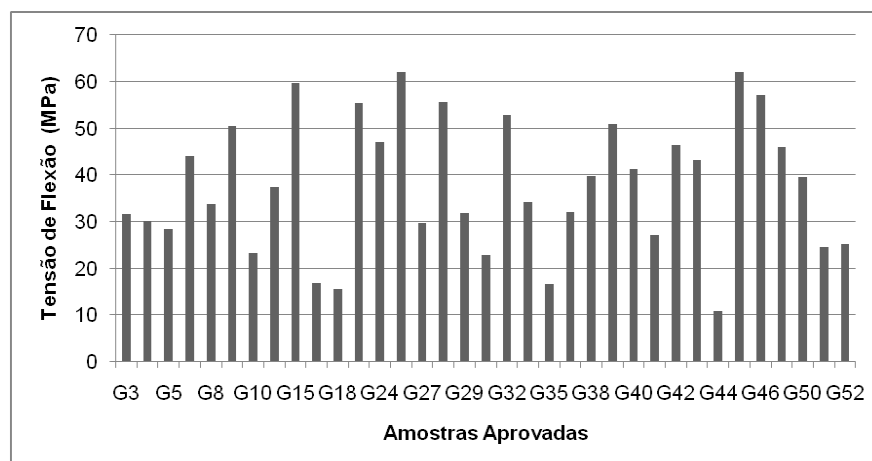


Fig.3.18 – Tensão de Flexão Amostras “Aprovadas”

Analisando agora os valores obtidos após o tratamento estatístico efectuado sobre os dados acima expressos, conclui-se o elevado grau de variabilidade da sub amostra o que representa um risco elevado, dado que o desvio padrão caracteriza 37,6% do valor médio ($f_{m,0}$ igual a 37,9MPa). Isto vai de encontro ao que se verificou no lote completo e que se descreveu atrás no ponto 3.4.3.

O valor característico apresentado para esta sub amostra é de 14,5MPa, sendo este inferior ao valor considerado pela classificação visual que é de 21MPa.

Quadro 3.11 – Valores Estatísticos para a Tensão de Flexão Das Amostras “Aprovadas”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$f_{m,0}$	σ	CV	$f_{m,0,k}$	f_m máx	f_m mín
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
37,9	14,2	37,6	14,5	62,1	10,7

3.5.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade é como vimos uma propriedade intrínseca da madeira muito importante, uma vez que é a partir deste que se conhece a capacidade resistente face às deformações. Tal como foi efectuado para o lote completo das amostras, também se procedeu ao cálculo do valor característico e médio de tal parâmetro para o sub-conjunto das vigas “Aprovadas”.

O objectivo de tais cálculos é comparar os valores obtidos com os valores recomendados pela classificação visual.

No quadro 3.12 e na figura 3.19 representam-se os valores considerados no tratamento estatístico e a representação gráfica que traduz o valor do módulo de elasticidade para cada viga aprovada.

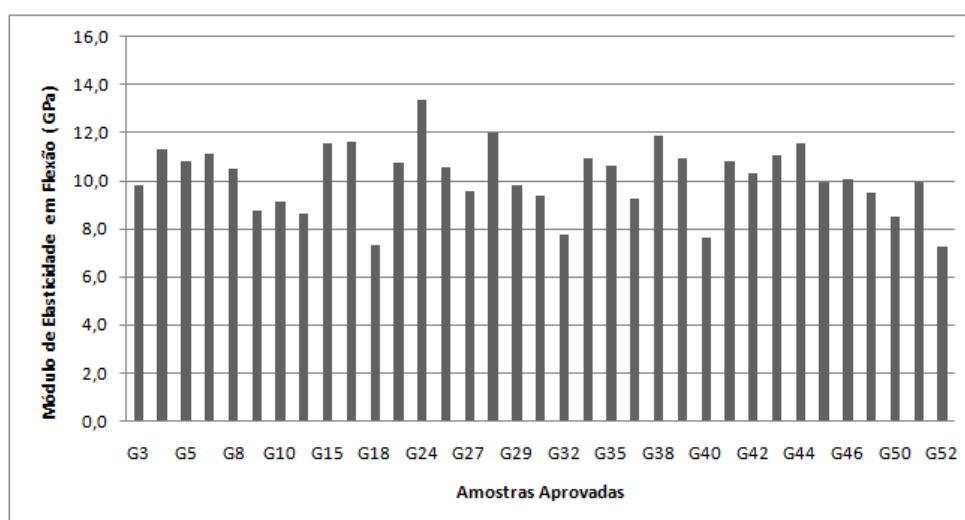


Fig.3.19 – Módulo de Elasticidade nas Amostras “Aprovadas”

Analisando o quadro 3.12 verificamos que o módulo de elasticidade médio da amostra é de 10,1GPa, valor acima do limite recomendado para a espécie botânica considerada que é de 8GPa. A variabilidade da amostra é de 14% o que, quando comparada com a encontrada no lote de amostras completo, não se mostra muito diferente dado que aí o valor obtido foi de 14,4%.

Quadro 3.12 – Valores Estatísticos do Módulo de Elasticidade Das Amostras “Aprovadas”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
E_{mean}	σ	CV	E_k	$E_{máx}$	$E_{mín}$
(GPa)	(GPa)	(%)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
10,1	1,4	14,0	7,8	13,4	7,3

3.6. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

3.6.1. MASSA VOLÚMICA

A aplicação deste critério à classificação por inspecção visual de madeiras antigas não faz muito sentido já que, além de ser de difícil determinação *in situ*, não permite retirar conclusões do tipo causa-efeito sobre a maior ou menor qualidade de um dado elemento estrutural. É de salientar também que os critérios que impõem limitações a defeitos, como nós, fendas ou descaios, são mais importantes

e como tal são capazes de implicar a rejeição de uma peça de madeira quando apenas um deles não cumpre o valor mínimo ou máximo definido. Pode assim recomendar-se que o critério “massa volumica” não seja considerado representativo do melhor ou pior desempenho mecânico de uma peça de madeira.

3.6.2. PRINCIPAIS TIPOS DE ROTURA

No decurso dos ensaios efectuados, verificaram-se roturas violentas por corte, mesmo para pequenas tensões aplicadas, motivando uma certa apreensão e conduzindo a uma postura de desconfiança face ao método proposto de classificação para a aplicação de madeira ardida em estruturas, já que algumas destas vigas foram “Aprovadas” (G4, G10, G18, G51).

Outras vigas, que exibiram mau comportamento à flexão com roturas frágeis, mostravam sinais visuais de menor qualidade bastante mais evidentes (combinações desfavoráveis de defeitos naturais) detectados pela inspecção realizada antes de cada ensaio. Estes sinais de fragilidade faziam adivinhar comportamentos menos resistentes mas sem indícios que pudessem apontar para um prognóstico preocupante caracterizado em traços gerais por roturas por corte frágil.

Assim deduz-se que, tendo como ferramenta de previsão a classificação visual de madeiras, não é seguro prever o comportamento de madeira ardida para utilização em estruturas, já que os casos onde a rotura atingiu contornos imprevisíveis representaram quase 14 % do número total de amostras ensaiados (sete vigas em cinquenta e duas). Outro motivo que justifica a afirmação anterior é o facto de, mesmo tendo em conta que o operador não tinha experiência na inspecção visual realizada, a classificação baseada em limitações das dimensões de defeitos não conseguiu colocar todas as vigas mais frágeis na classe “*Rejeitada*”, aprovando algumas que posteriormente evidenciaram roturas por corte ou resistência à flexão muito baixa. No que refere ao lote em estudo, as amostras G4, G10, G18 e G51 foram “Aprovadas” porque aparentemente cumpriam os critérios pré-estabelecidos no método de classificação visual mas, todas elas evidenciaram roturas frágeis por corte. Por outro lado, também ocorreram casos, como o G14, que foram rejeitados por não cumprirem as limitações impostas mas que depois vieram a apresentar um bom comportamento geral e um mecanismo de rotura dentro do esperado.

Com base no que foi dito no parágrafo anterior pode-se assim identificar algumas limitações no “método Amorim Faria” apresentado e a incapacidade deste prever com rigor o comportamento das vigas face às solicitações. Torna-se difícil aplicar a classificação visual a madeiras antigas *in situ* porque não se consegue ver o estado da peça no seu interior e com isto surge a impossibilidade de detectar eventuais patologias bióticas e as suas consequências (occos no interior ou nós ocultos). A integridade interior de uma peça de madeira não pode ser deduzida a partir da visualização do estado exterior.

3.6.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Para comentar e interpretar o comportamento da madeira ardida de Carvalho quando se encontra submetida a esforços de flexão, utilizaram-se os valores obtidos com os ensaios do lote “G” e o tratamento estatístico que sobre eles incidiu.

Em termos estatísticos, o valor característico da resistência à flexão do conjunto ficou-se por 22,8MPa, superior ao valor proposta no “método Amorim Faria” ($f_{m,0,k} = 21,0$ MPa). A diferença entre os valores característicos é relativamente pequena, o que pode levar a alguma falta de segurança caso se

considere o valor proposto como representativo da espécie de Carvalho. A amplitude de valores registados reforça esta afirmação já que se testemunhou uma diferença entre valores extremos da ordem de 58MPa, o que representa uma enorme dispersão de resultados. Sendo assim, a tentativa de atribuir um valor característico a um conjunto com dispersão tão elevada é quase inútil já que a grandeza do intervalo de valores é quase igual ao valor máximo registado ($f_{m, \text{máx}} = 62,1\text{MPa}$), significando com isto que o valor encontrado não representa correctamente o lote “G”.

Quando analisado o sub-lote das “Aprovadas”, estes valores revelam-se mais preocupantes, uma vez que o valor característico da amostra situa-se nos 14,5MPa. Existe portanto uma grande discrepância entre o valor característico estipulado pela classificação visual e o valor característico obtido experimentalmente para o sub-lote.

A par do que foi descrito para o lote completo, para o sub-lote das “Aprovadas” as incertezas relativamente à segurança sofrem um ligeiro agravamento, dada a diferença dos valores característicos e de o coeficiente de variação aumentar ligeiramente face ao obtido para o lote completo.

Os valores máximos e mínimos de tensão de flexão registados para as “Aprovadas” foram de 62,1MPa e 10,7MPa, daqui se podendo concluir que há uma grande dispersão entre os resultados obtidos, dado a amplitude do intervalo ser de 51MPa.

A principal razão do abaixamento do valor característico obtido associa-se à diminuição da dimensão da amostra e ao enorme peso que neste caso o desvio padrão assume. No geral, não se consegue perceber grande diferença entre os resultados obtidos para o lote global e para o sub-lote de amostras “Aprovadas”.

3.6.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

A partir do Módulo de Elasticidade, é possível determinar a resistência à flexão e obter uma relação da rigidez de uma viga. Por outro lado, sabe-se que, para um mesmo nível de tensão aplicada, quando maior for o módulo de elasticidade menor é a deformação exibida pela amostra (Lei de Hooke).

Verificou-se, em alguns provetes com módulos de elasticidade elevados, que após se retirar a solicitação, com a subida da célula de carga, parte da deformação visível da peça foi recuperada. A maioria das fendas geradas durante o ensaio fechou, comprovando-se com a aproximação das partes opostas da zona fissurada. Estes provetes evidenciaram um comportamento elástico praticamente até à rotura o que pode constituir uma desvantagem ao nível da ocultação de alguma degradação das fibras interiores.

No lote “G”, os valores determinados oscilam entre um valor máximo de 13,4 GPa e um valor mínimo de 6,8 GPa, exibindo assim uma amplitude entre eles de 6,6 GPa, o que é um valor significativo. O valor médio encontrado para o conjunto foi de 9,9 GPa e o desvio padrão de 1,4 GPa, representando 14,4% da média. Por sua vez, a média e o desvio padrão referidos deram origem a um valor característico do lote global de 7,6 GPa.

Para o lote das “Aprovadas” a amplitude do intervalo entre o valor máximo e mínimo registado é da ordem dos 6,1GPa, continuando a representar uma dispersão considerável de valores. O valor médio obtido para este sub-lote foi de 10,1GPa, valor ligeiramente acima do valor admissível pelo método “Amorim Faria” que, como já foi referido, é de 8GPa. Convém ainda referir que o coeficiente de variação deste conjunto de amostras é de 14%.

3.6.5. RELAÇÃO ENTRE CLASSIFICAÇÃO VISUAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS

O processo de classificação de peças de madeira antiga (com ou sem a afectação do fogo), baseado numa inspecção visual que limita a dimensão, tipo e forma dos defeitos presentes, é difícil e acarreta um elevado risco caso seja a única via para se conhecer o comportamento estrutural sem recorrer a meios destrutivos ou a equipamentos de inspecção não destrutiva.

A aplicação de um método de classificação visual a madeiras antigas por observação *in situ* é uma tarefa árdua e difícil de enquadrar nas classes definidas (Aprovada ou Rejeitada) tendo apenas presentes as dimensões físicas dos defeitos existentes; a visualização do estado interior, quer por meios directos de observação ou recorrendo a ensaios não destrutivos, e a consideração do posicionamento relativo dos defeitos na peça constituem dois parâmetros importantes e que não são considerados por qualquer método simples de classificação visual *in situ*.

Este método depende bastante da experiência de observação da pessoa/entidade envolvida no processo, já que a consideração de outros factores (como o posicionamento relativo dos defeitos em determinadas zonas da peça) e a sua importância no comportamento geral da peça face a esforços concretos exige experimentação e um vasto conhecimento na área em questão; com isto o processo de classificação de madeiras por inspecção visual exige eventual certificação prévia dos “classificadores” por parte de entidades públicas adequadas, podendo assim proporcionar resultados mais fiáveis.

Tendo em consideração o método “Amorim Faria”, os valores médios sugeridos para o módulo de elasticidade no lote completo estão pelo lado da segurança face aos valores médios obtidos experimentalmente; contudo verificou-se que 39% do número total de amostras ensaiadas à flexão apresentam valores para o módulo de elasticidade abaixo do valor médio considerado, constituindo-se como uma percentagem importante na população em estudo.

No caso do lote das “Aprovadas” verifica-se que existem apenas quatro vigas, que representam 11,1% das 36 amostras “Aprovadas”, cujo módulo de elasticidade se situa abaixo do limite regulamentar para este parâmetro.

Globalmente pode-se concluir desde já que a aprovação ou rejeição de vigas existentes baseadas num método de classificação visual “*in situ*” não parece uma actividade segura e fiável dada a enorme variabilidade de resultados obtidos e a total falta de significância das diferenças obtidas nos resultados referentes ao lote total e ao sub-lote das amostras “Aprovadas”.

4

CASO DE ESTUDO 2 – CAMPANHA EXPERIMENTAL 2010

4.1. OBJECTIVO

O presente capítulo pretende expor o trabalho levado a cabo durante a nova campanha experimental realizada em 2010, assim como apresentar os respectivos resultados.

O lote ensaiado inclui cinquenta (50) amostras de madeira de carvalho proveniente de incêndio com as seguintes dimensões: 0,05m de base, altura de 0,08m e comprimento igual a 1,10m. O lote foi globalmente designado por lote “P”.

O trabalho laboratorial efectuado e que suporta este capítulo resulta da necessidade de se obterem conclusões mais seguras sobre a relação entre a classe atribuída pela classificação visual *in situ* e os resultados obtidos em ensaio para madeira antiga sujeita a incêndio. Estas conclusões resultarão da comparação dos valores obtidos da campanha experimental decorrida em 2009, exposta na tese de Samuel Pereira, e na campanha agora efectuada, bem como na avaliação da fiabilidade do método de classificação visual de madeira antiga “*in situ*” designado por “método Amorim Faria”.

A campanha aqui descrita, análoga ao capítulo anterior, resulta da realização de um ensaio à flexão, segundo a norma europeia EN408 [29], em que há destruição dos provetes de ensaio e a partir da qual é possível obter um conjunto de dados que após relacionados com fórmulas presentes na referida norma permitem obter características mecânicas, nomeadamente, módulo de elasticidade e tensão de flexão, que ajudam a compreender melhor o comportamento da madeira para possível uso como elemento estrutural.

É de referir que a norma acima mencionada aconselha a utilização de provetes de dimensões reais contendo defeitos, estando a sua realização sujeita a uma duração e condições de temperatura e humidade relativa do ar normalizados. Esta norma especifica metodologias de ensaio para a determinação de certas propriedades mecânicas, como é o caso do módulo de elasticidade em flexão e da resistência à flexão. Especifica ainda o modo de determinação das dimensões e da massa volúmica das peças a ensaiar, aspectos importantes na preparação da campanha experimental.

O objectivo da campanha, é pois, obter dados através dos ensaios, que permitam fundamentalmente testar a fidelidade dos critérios estipulados e os valores limite fixados, designadamente, para o módulo de elasticidade (E_{mean}) e tensão de flexão ($f_{m,k}$) na proposta de classificação visual desenvolvida na tese da Sónia Franco em 2008 [30] e designado de método “Amorim Faria”.

4.2. CLASSIFICAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS

4.2.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL DO LOTE

O lote a ensaiar consistiu em amostras de madeira antiga analisadas e utilizadas no ensaio à flexão e foram vigas de carvalho que sofreram incêndio, apresentavam defeitos e o corte das peças apresentava dimensões bem definidas.

As amostras apresentavam-se sob a forma de paralelepípedos, com dimensões iguais em todas as vigas, $0,05 \times 0,08 \times 1,10 \text{ m}^3$. O conjunto de vigas que constituíam a amostra foram representadas pela letra “P_i”, sendo i, o número da viga a ensaiar, procedeu-se ainda á identificação e numeração (1 a 6) de todas as faces. À semelhança do que havia sido feito em 2009 e que possibilitou caracterizar os defeitos presentes em cada face da viga em estudo, permitindo uma inspecção visual mais detalhada para posterior validação da classificação proposta.

As vigas apresentavam-se, na sua generalidade, num estado razoável, embora houvesse a existência de muitas marcas de incêndio e alguma fendilhação, que por vezes acompanhava o comprimento total das vigas. Em algumas vigas havia ainda pontualmente perda de material.

Embora se tenham testado todas as vigas, houve duas vigas, P7 e P23, que não contribuíram com os seus resultados para os valores finais, uma vez que os ensaios não se revelaram válidos. Os motivos que causaram tal facto estão inerentes a erro no sistema de transmissão de carga e de uma das amostras se encontrar demasiado fendilhada e não se justificar a realização do ensaio.

4.2.2. CLASSIFICAÇÃO VISUAL

O método de classificação visual com o intuito de classificar visualmente peças estruturais de madeira antiga é um processo rigoroso e que requer um grande conhecimento sobre madeira e as suas características, nomeadamente defeitos que influenciam directamente nas classes a serem atribuídas às peças inspeccionadas, por parte da entidade ou pessoa que o executa.

Tendo por base o quadro 3.1 e o que foi exposto no capítulo anterior, procedeu-se à inspecção visual das cinquenta amostras do lote “P”, tendo sido registados todos os defeitos relevantes. A informação recolhida foi compilada no quadro 4.1, onde se aponta a existência de defeitos e quais as suas dimensões. Estas informações podem ser consultadas globalmente no anexo A.2.

A inspecção visual realizou-se imediatamente antes do início da campanha experimental. Antes de as vigas serem ensaiadas, procedeu-se ao registo fotográfico e apontaram-se todos os defeitos e anotações que permitiam realizar a classificação visual. Na figura 4.1 está retratado um exemplo do registo fotográfico efectuado.



Fig.4.1 – Tipo de registo fotográfico realizado. Pormenores de defeitos

Após a junção de todos os aspectos que interessam na classificação visual, procedeu-se à atribuição das classes qualitativas *Aprovada* ou *Rejeitada* às amostras. A classificação atribuída encontra-se compilada no quadro 4.1.

Quadro 4.1- Classificação atribuída às amostras do lote “P”

Viga	Classificação Visual	Observações	Viga	Classificação Visual	Observações
P1	rejeitada	nó com dimensão não desprezável e alguma fendilhação	P26	aprovada	
P2	aprovada		P27	rejeitada	ataque biológico activo e nós com dimensões entre os 40 e 75 mm
P3	rejeitada	ataque biológico activo, alguma fendilhação e nós não desprezáveis	P28	aprovada	
P4	rejeitada	nós de grandes dimensões, ataque biológico activo e fendilhação na face 3 no sentido das fibras	P29	aprovada	
P5	rejeitada	nós importantes	P30	rejeitada	nós com dimensões entre os 20 e os 65mm
P6	aprovada		P31	aprovada	
P7	rejeitada	nós importantes e ataque biológico activo	P32	aprovada	
P8	rejeitada	nós de dimensões consideráveis	P33	rejeitada	nós com dimensões entre os 10 e os 60mm
P9	rejeitada	ataque biológico activo, fendilhação não desprezável e nós muito próximos	P34	rejeitada	ataque biológico activo e nós de dimensões significativas, $10\text{mm} \leq d \leq 110\text{mm}$
P10	rejeitada	nós de elevadas dimensões	P35	aprovada	
P11	rejeitada	nó de grande dimensão e fendilhação	P36	rejeitada	ataque biológico e nós com dimensões até 70mm
P12	rejeitada	ataque biológico activo, nós agrupados com $d \leq 50\text{mm}$	P37	rejeitada	ataque biológico e nós com dimensões até 70mm
P13	aprovada		P38	aprovada	
P14	rejeitada	diâmetro dos nós compreendido entre os 25mm e os 60mm e ataque biológico activo	P39	rejeitada	Na face 2, junto à zona de carregamento à direita existem 4 nós juntos e de dimensões consideráveis
P15	rejeitada	nó com diâmetro igual a 60mm	P40	rejeitada	nós com dimensões significativas
P16	aprovada		P41	rejeitada	nós de grandes dimensões
P17	rejeitada	ataque biológico activo	P42	aprovada	
P18	rejeitada	fenda com comprimento igual a 42,5cm	P43	rejeitada	ataque biológico activo e nós de dimensões significativas
P19	rejeitada	nós com diâmetros com diâmetros compreendidos entre os 11 e os 60mm	P44	rejeitada	face 3 apresenta uma fenda que acompanha o comprimento da viga
P20	aprovada		P45	aprovada	
P21	rejeitada	ataque biológico activo, fendas com extensão significativa $L_f \leq 36\text{cm}$ e nós de grandes dimensões $d \leq 120\text{mm}$	P46	rejeitada	fendilhação ao longo da face 3 e nós significativos
P22	aprovada		P47	rejeitada	ataque biológico activo e nós de dimensões significativas
P23	rejeitada	ataque biológico activo, fenda de grande comprimento $L_f \leq 48\text{cm}$, perda de material significativo	P48	rejeitada	nós de grandes dimensões
P24	rejeitada	A face 1 apresenta uma fenda ao longo de todo o comprimento da viga, nós com diâmetros até 60mm	P49	rejeitada	ataque biológico activo e fibras com curvatura
P25	aprovada		P50	rejeitada	fenda e nós de dimensões significativas

4.2.3. AMOSTRAS “APROVADAS”

O número de amostras “Aprovada” foi bastante reduzido, representando apenas 32% do conjunto total de amostras. No total, as amostras que cumpriram os limites impostos pelo método de classificação visual foram dezasseis (16), valor bem abaixo do verificado na campanha experimental realizada em 2009 onde foram aprovadas trinta e seis (36).

Este factor era expectável, uma vez que as amostras apresentavam um aspecto visual em que era facilmente perceptível fendilhação, ataque biológico e caruncho, nós e muitas marcas de incêndio.

4.2.4. AMOSTRAS “REJEITADAS”

A percentagem de rejeições é de 68%, a que corresponde trinta e quatro vigas cujos defeitos ultrapassaram os limites aceitáveis para aprovação.

Os defeitos que mais contribuíram para a rejeição são, de acordo com o quadro 4.1, os nós, fendas de grandes dimensões e ataque biológico activo.

4.3. ENSAIOS À FLEXÃO - CONSIDERAÇÕES GERAIS

4.3.1. SETUP DE ENSAIO

Os ensaios à flexão foram executados no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), sob amostras reais evidenciando todas as especificidades susceptíveis de influenciar a variação das características da madeira e consequentemente o seu comportamento. A execução e preparação do setup de ensaio ficaram a cargo de dois técnicos do laboratório.

A realização deste ensaio permitiu obter duas características mecânicas da madeira, módulo de elasticidade e a tensão em flexão, que para o caso em estudo se revelam primordiais, dado contribuírem para a validação da classificação visual proposta e ainda comparar com os resultados obtidos na campanha experimental de 2009.

Como foi visto no ponto 3.3.1, a norma europeia EN 408 [29] especifica métodos de ensaio para a determinação do módulo de elasticidade em flexão e para a determinação da resistência à flexão de peças prismáticas de madeira.

No caso em estudo, não foi possível aplicar o disposto na referida norma dado que as dimensões das peças (0,05x0,08x1,10) não cumpriam o comprimento mínimo especificado ($L_{\min}=19 \times 0,08=1,52\text{m}$). Assim adoptou-se um esquema em tudo semelhante ao esquema ilustrado na norma, mas com ligeiras alterações no que refere às distâncias de aplicação da carga e da localização dos apoios (ver fig. 4.2). A distância entre a aplicação das cargas e os apoios foi de 35cm. A figura 4.3 retrata o esquema real utilizado.

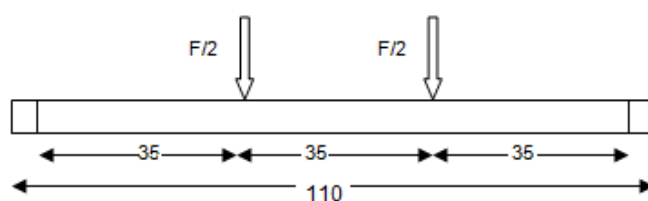


Fig.4.2 – Esquema de ensaio

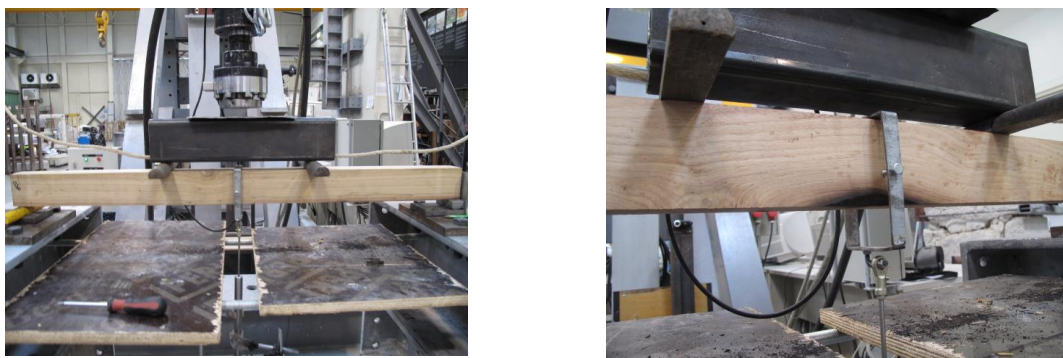


Fig.4.3 – Setup de ensaio

O ensaio traduz-se na aplicação de duas cargas pontuais simétricas aplicadas aos terços do comprimento de um provete de madeira simplesmente apoiado e na medição da deformação que este vai sofrendo com o decorrer do ensaio.

O setup de ensaio consiste, resumidamente, em colocar o provete de ensaio sobre um meio cilindro e um paralelepípedo que materializam apoios simples. O actuador hidráulico transmite a carga à amostra que é distribuída com o auxílio de um perfil metálico (de secção quadrada e oca) colocado sobre o provete, apoiando-se em dois perfis idênticos aos que concretizam os apoios simples. O LVDT é fixado à amostra por meio de um parafuso e consiste num perfil flexível que permite medir os deslocamentos. No capítulo 3, no ponto 3.3.1, pode ser consultado com mais detalhe a explicação do setup de ensaio, obviamente análogo nas duas campanhas de ensaio realizadas.

4.3.2. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

A preparação das amostras, nomeadamente identificação, determinação das dimensões, massa e ainda do registo fotográfico e inspecção visual detalhada foi o ponto de partida dos ensaios à flexão.

Estas tarefas são importantes na medida em que permitem classificar cada amostra visualmente, recorrendo para isso à informação recolhida nas tarefas acima mencionadas e na análise de todos os detalhes inerentes aos defeitos que são possíveis registar e medir nas faces das amostras em estudo.

A execução do ensaio de flexão consistiu na colocação do provete sobre os apoios, no qual se aplicou uma força perpendicular ao fio da madeira, ao qual se acoplou um transdutor de deslocamentos. Após o ajuste entre o actuador e o perfil metálico, procedeu-se à aplicação da carga que seguiu um tempo normalizado pela norma EN408 [29]. A transmissão de carga decorreu a um ritmo de 0,1 mm/s até ser atingida a rotura. O ensaio era considerado terminado, quando após uma análise do gráfico fornecido pelo equipamento de leitura de dados se percebia que o comportamento da amostra tinha estabilizado, verificando-se apenas deslocamentos cada vez maiores e sustentando cargas pouco significativas e de valor praticamente constante.

No final de cada ensaio foram registados todos os aspectos que se consideraram relevantes, tais como carga máxima e comportamento demonstrado no decorrer do ensaio, tipo de rotura verificado e registo fotográfico. Procurou-se ainda comparar o desempenho da peça durante o ensaio e a classe que lhe tinha sido atribuída previamente por inspecção visual.

4.3.3. PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS A REGISTRAR

Os modos de rotura na madeira não seguem um modo de rotura padrão, dado ser um material anisotrópico e cujas características intrínsecas estão dependentes da presença ou não de defeitos.



Fig.4.4 – Amostras submetidas ao ensaio de flexão

Para se poder efectuar algumas reflexões sobre os mecanismos de rotura mais frequentemente observáveis e o comportamento que as vigas apresentaram durante a execução do ensaio, procedeu-se a uma análise visual dos provetes de ensaio após a realização do ensaio e a uma visualização exaustiva dos vídeos e fotografias obtidas no decorrer dos mesmos. No anexo A.3, poderão ser consultados o conjunto global de comentários de carácter geral evidenciados para cada ensaio.

Um aspecto a salientar é o comportamento de algumas vigas “Rejeitadas”, que no decorrer do ensaio mostraram um bom comportamento, ou seja, aguentaram cargas que ultrapassaram os 10KN (vigas P9, P17, P19). Por outro lado houve vigas “Aprovadas” que contrariamente ao que seria expectável apresentaram valores baixos de carga, entre os 5 e 10KN (P22, P26).

As roturas deram-se sobretudo na zona de flexão circular e ainda em locais onde estavam presentes nós de grandes dimensões. Quando estes começavam a romper normalmente eram acompanhados de forte ruído. Na figura 4.5 estão presentes algumas das roturas observadas.



Fig.4.5 – Exemplos de roturas que tiveram origem em nós presentes nas amostras

Um outro aspecto interessante que merece referência refere-se ao descolamento das fibras que por vezes se verificava, quando as roturas se davam por desenvolvimento de fendas já pré-existentes. Nas figuras 4.6 estão representados alguns desses casos.



Fig.4.6 – Exemplos de roturas que tiveram origem em fendas já existentes na amostra

4.4. LOTE COMPLETO – RESULTADOS

4.4.1. MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica é, como já se referiu, uma das propriedades físicas mais importantes da madeira, dado que dela dependem outras propriedades e como tal, é um dos parâmetros que entra na classificação da madeira.

A massa das amostras do lote “P” obteve-se por pesagem das vigas numa balança digital (fornecendo esta o resultado em gramas e com quatro algarismos). Para a medição do volume recorreu-se a uma fita métrica para medir o comprimento e a uma régua para a medição da base e da altura das vigas.

A determinação da massa volúmica consistiu na medição e pesagem dos provetes. Realizaram-se medições e pesagens para as cinquenta (50) vigas que constituíam a amostra.

Os resultados obtidos para a massa volúmica correspondem ao total da amostra, ou seja as cinquenta vigas ensaiadas. Na figura 4.7 encontra-se a representação gráfica da amostra e no quadro 4.2 estão expostos os valores obtidos.

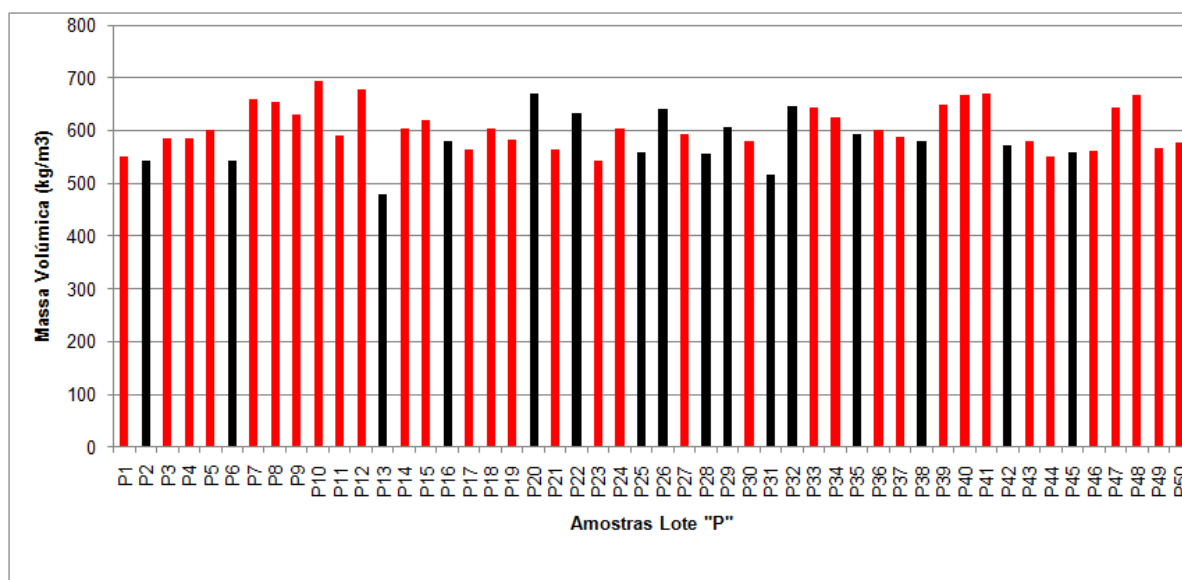


Fig.4.7 – Massa volúmica das amostras do lote “P”

Quadro 4.2 – Massa volúmica de amostras do lote “P”

viga	b (m)	h (m)	L (m)	Massa (Kg)	ρ (kg/m ³)	viga	b (m)	h (m)	L (m)	Massa (Kg)	ρ (kg/m ³)
P1	0,05	0,08	1,10	2,428	551,8	P26	0,05	0,08	1,10	2,819	640,7
P2	0,05	0,08	1,10	2,391	543,4	P27	0,05	0,08	1,10	2,607	592,5
P3	0,05	0,08	1,10	2,579	586,1	P28	0,05	0,08	1,10	2,447	556,1
P4	0,05	0,08	1,10	2,573	584,8	P29	0,05	0,08	1,10	2,671	607,0
P5	0,05	0,08	1,10	2,643	600,7	P30	0,05	0,08	1,10	2,550	579,5
P6	0,05	0,08	1,10	2,385	542,0	P31	0,05	0,08	1,10	2,277	517,5
P7	0,05	0,08	1,10	2,902	659,5	P32	0,05	0,08	1,10	2,844	646,4
P8	0,05	0,08	1,10	2,877	653,9	P33	0,05	0,08	1,10	2,835	644,3
P9	0,05	0,08	1,10	2,773	630,2	P34	0,05	0,08	1,10	2,746	624,1
P10	0,05	0,08	1,10	3,051	693,4	P35	0,05	0,08	1,10	2,612	593,6
P11	0,05	0,08	1,10	2,602	591,4	P36	0,05	0,08	1,10	2,646	601,4
P12	0,05	0,08	1,10	2,981	677,5	P37	0,05	0,08	1,10	2,583	587,0
P13	0,05	0,08	1,10	2,104	478,2	P38	0,05	0,08	1,10	2,550	579,5
P14	0,05	0,08	1,10	2,652	602,7	P39	0,05	0,08	1,10	2,852	648,2
P15	0,05	0,08	1,10	2,732	620,9	P40	0,05	0,08	1,10	2,939	668,0
P16	0,05	0,08	1,10	2,552	580,0	P41	0,05	0,08	1,10	2,945	669,3
P17	0,05	0,08	1,10	2,477	563,0	P42	0,05	0,08	1,10	2,521	573,0
P18	0,05	0,08	1,10	2,662	605,0	P43	0,05	0,08	1,10	2,553	580,2
P19	0,05	0,08	1,10	2,566	583,2	P44	0,05	0,08	1,10	2,421	550,2
P20	0,05	0,08	1,10	2,950	670,5	P45	0,05	0,08	1,10	2,463	559,8
P21	0,05	0,08	1,10	2,485	564,8	P46	0,05	0,08	1,10	2,466	560,5
P22	0,05	0,08	1,10	2,790	634,1	P47	0,05	0,08	1,10	2,835	644,3
P23	0,05	0,08	1,10	2,393	543,9	P48	0,05	0,08	1,10	2,936	667,3
P24	0,05	0,08	1,10	2,654	603,2	P49	0,05	0,08	1,10	2,491	566,1
P25	0,05	0,08	1,10	2,461	559,3	P50	0,05	0,08	1,10	2,540	577,3

Com os valores obtidos, no quadro exposto, procedeu-se ao tratamento estatístico, com o intuito de encontrar o valor médio para a massa volúmica que caracteriza a amostra. O quadro 4.3 apresenta os valores obtidos

Quadro 4.3 – Valores estatísticos para a massa volúmica do lote “P”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
ρ_m	σ	CV	ρ_k	ρ_{\max}	ρ_{\min}
(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
599,1	46,0	7,7	523,6	693,4	478,2

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o valor médio, 599,1Kg/m³ é praticamente igual ao valor recomendado para a massa volúmica pelo método “Amorim Faria” de 600Kg/m³. A variabilidade da amostra é relativamente baixa, situando-se nos 7,7%.

4.4.2. DIAGRAMAS DE ENSAIO

Um dos parâmetros que os ensaios à flexão permitem obter é a capacidade resistente da peça quando submetida a esforços de flexão. Devido à variabilidade da madeira, visto ser um material anisotrópico, na amostra em estudo obtiveram-se valores e comportamentos distintos para cada viga.

O equipamento mecânico em que foram realizados os ensaios à flexão no LESE, permitiram obter as cargas e os deslocamentos para cada viga.

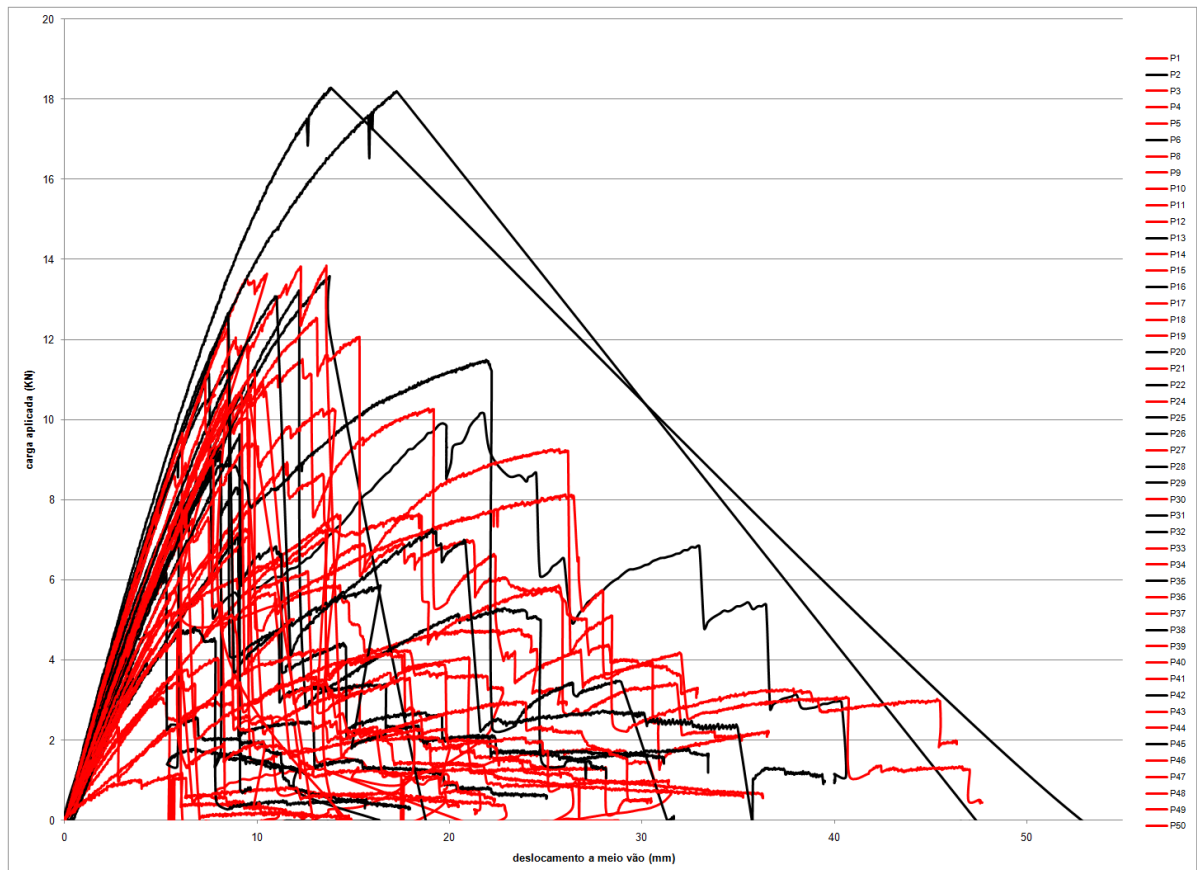


Fig.4.8 – Carga aplicada vs deslocamento a meio vão das amostras do lote “P”

4.4.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Com o valor da carga máxima e aplicando a fórmula (3.1) definida no ponto 3.4.3 obtiveram-se os valores de tensão máxima para os quarenta e oito ensaios válidos. A figura 4.8 apresenta a representação gráfica para a carga aplicada e deslocamento a meio vão verificados para cada viga e a figura 4.9 a tensão de flexão obtida para cada amostra. No quadro 4.4 podem ser consultados os valores resultantes assim como a representação gráfica que ajuda a entender melhor os valores obtidos para cada viga.

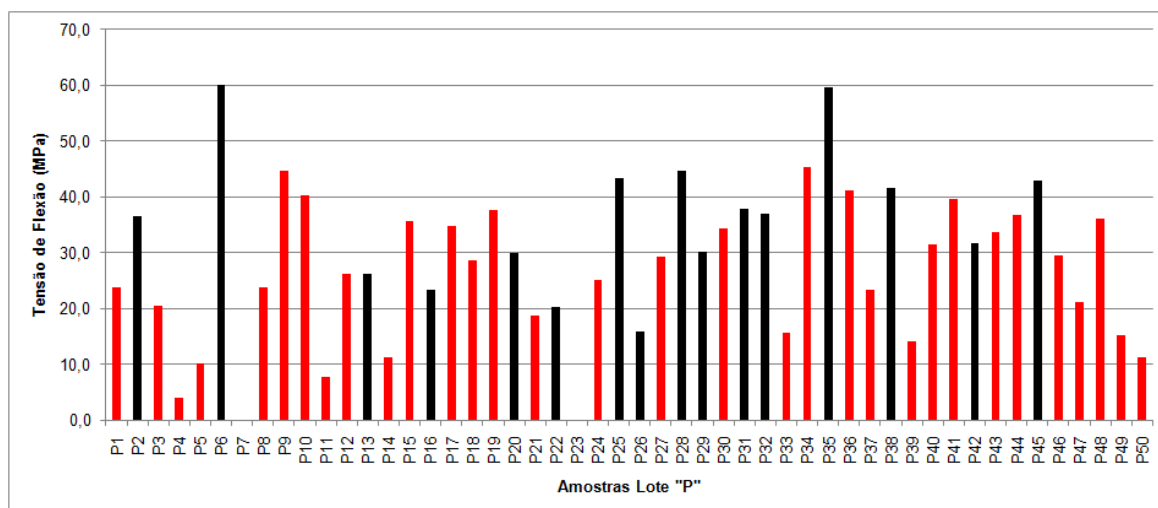


Fig.4.9 – Tensão de flexão das amostras do lote "P"

Quadro 4.4 – Resultados dos Ensaio de Flexão do Lote "P"

viga	carga máxima (KN)	deformação a 1/2vão (mm)	a (mm)	w(mm²)	σflexão (MPa)	Eflexão (MPa)
P1	7,2	19,9	350	53333,3	23,7	11,7
P2	11,1	40,6	350	53333,3	36,5	6,5
P3	6,3	21,0	350	53333,3	20,5	7,4
P4	1,2	14,8	350	53333,3	3,9	2,6
P5	3,1	22,9	350	53333,3	10,1	10,6
P6	18,3	62,8	350	53333,3	60,0	13,1
P7	anulado					
P8	7,2	26,4	350	53333,3	23,8	5,7
P9	13,6	22,8	350	53333,3	44,7	12,8
P10	12,3	21,6	350	53333,3	40,2	14,6
P11	2,3	12,6	350	53333,3	7,7	7,7
P12	8,0	31,5	350	53333,3	26,3	9,9
P13	8,0	16,4	350	53333,3	26,1	12,9
P14	3,5	11,1	350	53333,3	11,3	6,3
P15	10,9	36,3	350	53333,3	35,7	12,9
P16	7,1	25,0	350	53333,3	23,3	7,6
P17	10,6	26,1	350	53333,3	34,7	11,5
P18	8,7	32,9	350	53333,3	28,6	14,8
P19	11,5	36,6	350	53333,3	37,7	12,2
P20	9,1	12,5	350	53333,3	30,0	10,9
P21	5,7	30,5	350	53333,3	18,7	9,0
P22	6,2	18,0	350	53333,3	20,3	12,3
P23	anulado					
P24	7,6	28,8	350	53333,3	25,1	11,0
P25	13,2	33,5	350	53333,3	43,4	12,0

viga	carga máxima (KN)	deformação a 1/2vão (mm)	a (mm)	w(mm²)	σflexão (MPa)	Eflexão (MPa)
P26	4,8	15,7	350	53333,3	15,8	9,8
P27	8,9	35,2	350	53333,3	29,3	10,9
P28	13,6	23,3	350	53333,3	44,6	11,1
P29	9,2	28,2	350	53333,3	30,2	11,9
P30	10,5	14,9	350	53333,3	34,4	12,0
P31	11,5	31,7	350	53333,3	37,7	10,7
P32	11,3	31,2	350	53333,3	36,9	14,7
P33	4,8	20,5	350	53333,3	15,6	8,0
P34	13,8	30,3	350	53333,3	45,4	12,0
P35	18,2	47,5	350	53333,3	59,7	13,9
P36	12,6	46,4	350	53333,3	41,2	10,6
P37	7,1	22,4	350	53333,3	23,4	8,9
P38	12,7	16,7	350	53333,3	41,6	14,3
P39	4,3	25,8	350	53333,3	14,1	6,0
P40	9,6	7,5	350	53333,3	31,4	15,1
P41	12,0	12,9	350	53333,3	39,5	13,1
P42	9,6	9,7	350	53333,3	31,6	10,3
P43	10,3	17,9	350	53333,3	33,7	9,5
P44	11,2	47,7	350	53333,3	36,8	10,9
P45	13,1	39,5	350	53333,3	42,9	11,4
P46	9,0	12,9	350	53333,3	29,5	11,2
P47	6,4	31,4	350	53333,3	21,1	9,6
P48	11,0	11,9	350	53333,3	36,2	15,2
P49	4,6	10,4	350	53333,3	15,2	8,2
P50	3,5	35,3	350	53333,3	11,3	3,8

No quadro 4.5 estão os valores que definem a amostra no que respeita à tensão de flexão. É de salientar desde logo a elevada variabilidade da amostra, 42,1% (o desvio padrão representa 42,1% da média da tensão de flexão), valor que deve ser entendido com alguma preocupação.

O valor característico obtido é de 9,2MPa, valor bem abaixo do defendido na proposta de classificação, que é de 21MPa.

Quadro 4.5 – Valores estatísticos para a tensão de flexão do lote “P”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$f_{m,0}$	σ	CV	$f_{m,0,k}$	$f_{m \text{ máx}}$	$f_{m \text{ min}}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
29,8	12,5	42,1	9,2	60,0	3,9

4.4.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O outro parâmetro que interessa caracterizar aquando da realização de ensaios à flexão é o módulo de elasticidade. Este parâmetro revela a rigidez do material e mediante o seu valor pode-se concluir sobre a sua capacidade de deformação.

O módulo de elasticidade em flexão obtido para cada viga, foi distinto dado que cada viga apresenta características intrínsecas individualizadas. O valor do módulo de elasticidade foi calculado pela fórmula 3.3 descrita no ponto 3.4.4. No quadro 4.6 estão representados os valores obtidos.

Quadro 4.6 – Valores estatísticos para o módulo de elasticidade do lote “P”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
E_{mean}	σ	CV	E_k	$E_{máx}$	E_{min}
(GPa)	(GPa)	(%)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
10,6	2,9	27,6	5,8	15,2	2,6

A figura 4.10 apresenta a representação gráfica dos valores obtidos e presentes no quadro 4.4.

Um facto interessante de analisar é os valores para o módulo de elasticidade que variam entre os 15,2 GPa e os 2,6GPa, sendo a diferença entre estes valores máximos e mínimos bastante significativa. O valor médio da amostra encontrado é de 10,6 GPa, o que constitui um bom valor quando comparado com o valor proposto no método “Amorim Faria” de 8GPa.

É de assinalar que o desvio padrão constitui 27,6% do valor médio, demonstrando uma elevada heterogeneidade da amostra em estudo. O valor característico é de 5,8GPa.

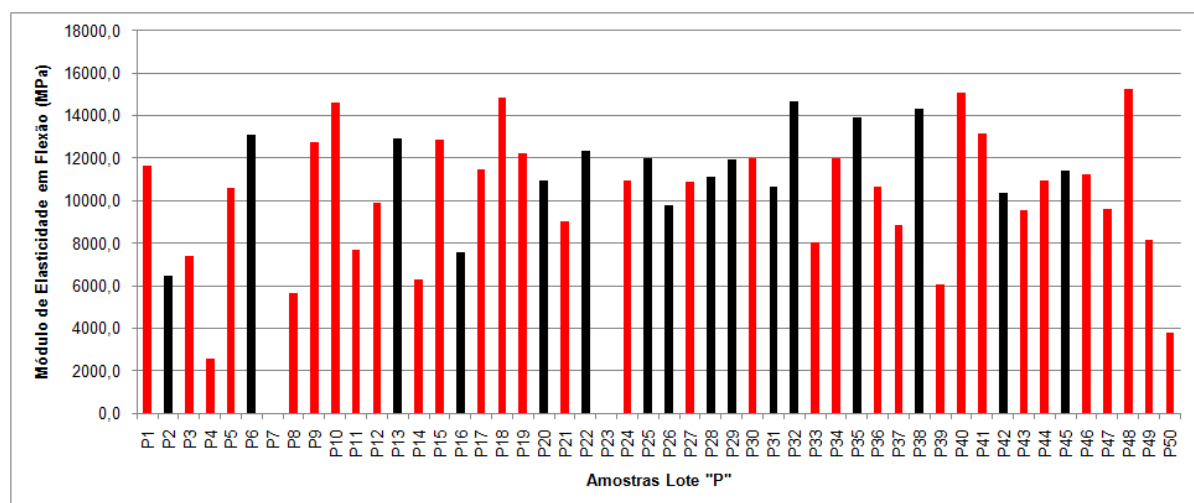


Fig.4.10 – Módulo de elasticidade das amostras do lote “P”

4.5. LOTE DE AMOSTRAS “APROVADAS” – RESULTADOS

4.5.1. MASSA VOLÚMICA

Cingindo o estudo da massa volúmica agora ao sub-lote das dezasseis (16) vigas “Aprovadas”, analisa-se a influência da classificação atribuída face aos resultados obtidos para o lote completo.

Para este sub grupo calculou-se a massa volúmica utilizando procedimento análogo ao utilizado para o lote completo, tendo-se registado os valores expostos no quadro 4.7 e a respectiva representação gráfica na figura 4.11.

Quadro 4.7 – Massa Volúmica das Amostras “Aprovadas” do lote “P”

vigas aprovadas	b (m)	h (m)	L (m)	$\rho(\text{kg/m}^3)$
P2	0,05	0,08	1,10	543,409
P6	0,05	0,08	1,10	542,045
P13	0,05	0,08	1,10	478,182
P16	0,05	0,08	1,10	580,000
P20	0,05	0,08	1,10	670,455
P22	0,05	0,08	1,10	670,455
P25	0,05	0,08	1,10	634,091
P26	0,05	0,08	1,10	559,318
P28	0,05	0,08	1,10	640,682
P29	0,05	0,08	1,10	556,136
P31	0,05	0,08	1,10	607,045
P32	0,05	0,08	1,10	517,500
P35	0,05	0,08	1,10	646,364
P38	0,05	0,08	1,10	593,636
P42	0,05	0,08	1,10	579,545
P45	0,05	0,08	1,10	559,7727

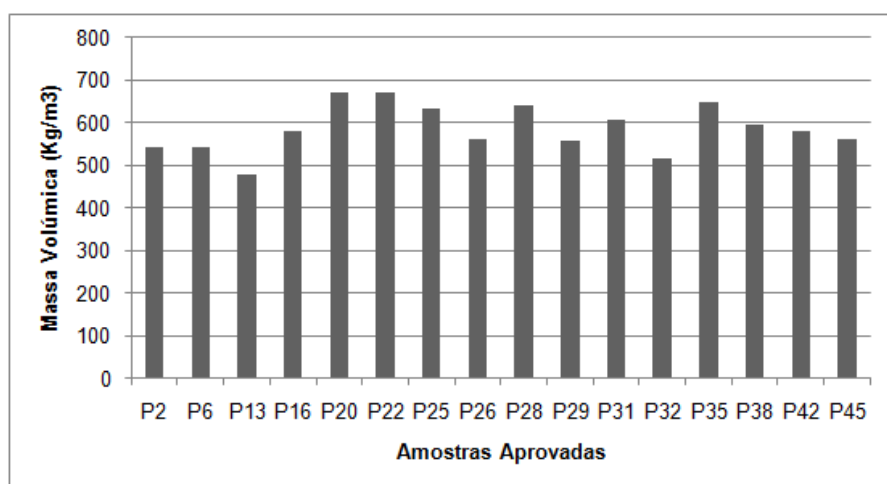


Fig.4.11 – Massa volúmica do sub-lote “Aprovadas”

Analisando os resultados obtidos (quadro 4.8), verifica-se um pequeno aumento do coeficiente de variação, situando-se agora nos 9,5%. Isto significa que o valor médio baixou face ao obtido para o lote completo. O valor médio para o lote das “Aprovadas” é de $586,2 \text{ kg/m}^3$, situando-se abaixo dos 600 kg/m^3 que é o valor recomendado para a espécie botânica em estudo.

Quadro 4.8 – Valores estatísticos para a massa volúmica do sub-lote “Aprovadas”

Média	Desvio padrão	Coeficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
ρ_m	σ	CV	ρ_k	$\rho_{\text{máx}}$	$\rho_{\text{mín}}$
(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
586,2	55,5	9,5	495,2	670,5	478,2

4.5.2. DIAGRAMAS DE ENSAIO

A figura 4.12 representa os diagramas de ensaio obtidos para cada uma das amostras do sub-lote.

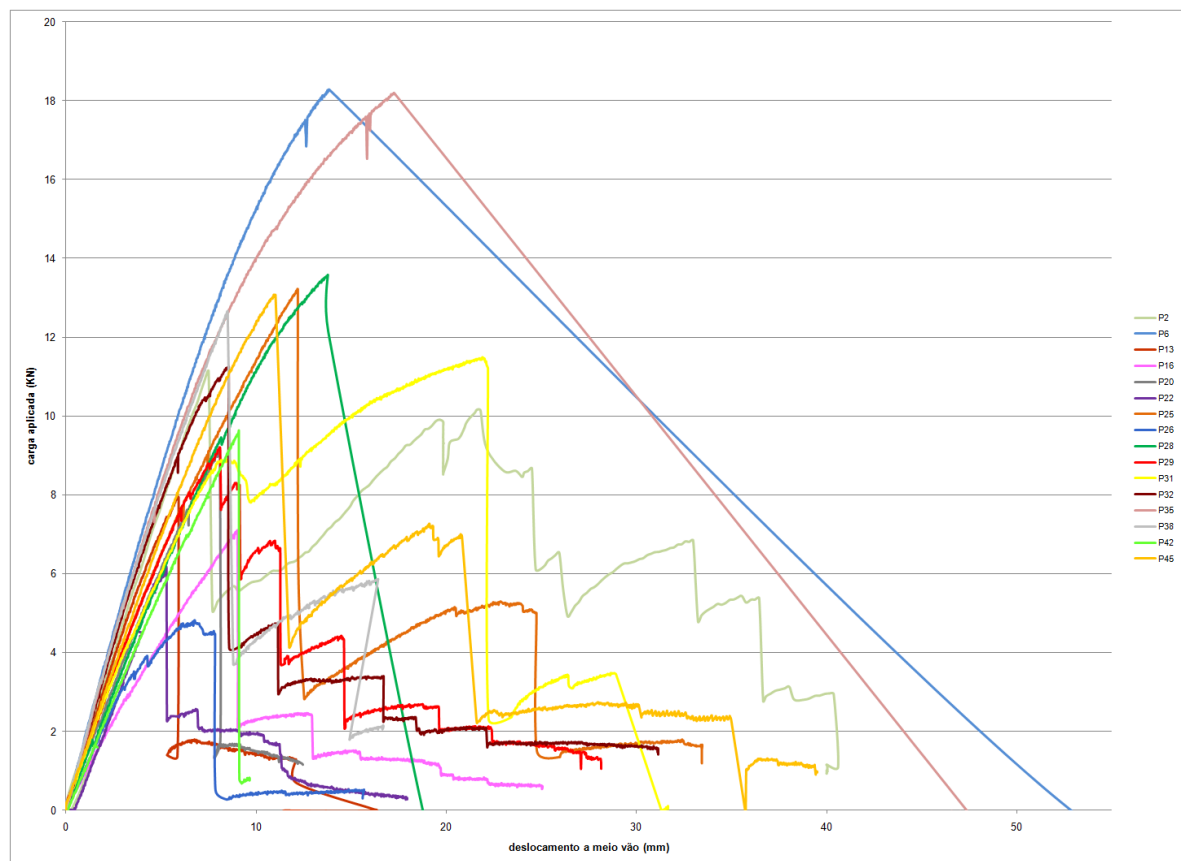


Fig.4.12 – Carga aplicada vs deslocamento a meio vão das amostras “Aprovadas” do lote “P”

4.5.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O estudo da tensão de flexão deste sub-lote revela-se de elevado interesse, uma vez que os valores característicos de tensão de flexão obtidos neste ponto permitem a validação e/ou criticar a proposta de classificação visual efectuada para o lote completo.

O quadro 4.9 e a figura 4.13 apresentam os valores obtidos para este sub-lote.

Quadro 4.9 – Valores para a tensão e módulo de elasticidade em flexão do sub- lote “P”

vigas aprovadas	σ flexão (MPa)	E flexão (GPa)
P2	36,5	6,5
P6	60,0	13,1
P13	26,1	12,9
P16	23,3	7,6
P20	30,0	10,9
P22	20,3	12,3
P25	43,4	12,0
P26	15,8	9,8
P28	44,6	11,1
P29	30,2	11,9
P31	37,7	10,7
P32	36,9	14,7
P35	59,7	13,9
P38	41,6	14,3
P42	31,6	10,3
P45	42,9	11,4

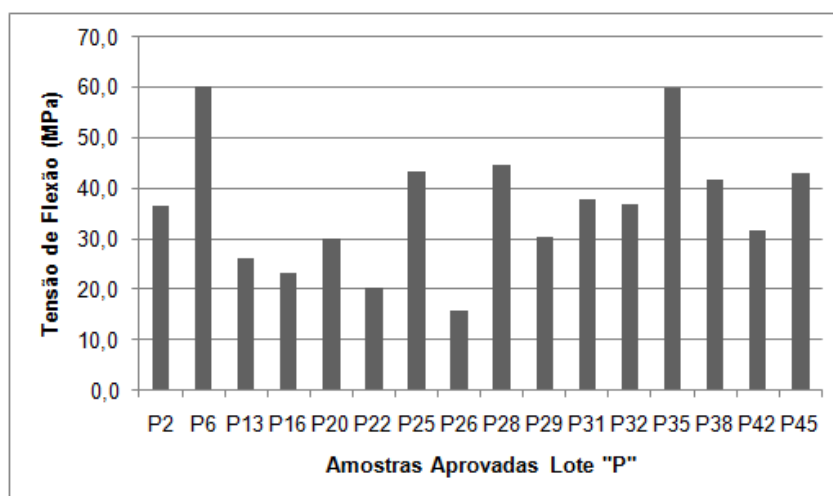


Fig.4.13 – Tensão de flexão do sub-lote “Aprovadas”

Tendo por base os valores acima expostos e os resultados obtidos no quadro 4.10, conclui-se que a sub-amostra apresenta um elevado grau de variabilidade, dado que o desvio padrão representa 34,5% do valor médio ($f_{m,0}$ igual a 36,3MPa). Daqui resulta que as vigas deste sub-lote apresentam valores pouco fiáveis, uma vez que os valores apresentam uma dispersão elevada e portanto um elevado risco associado.

O valor característico apresentado para esta sub amostra é de 15,8MPa, sendo este inferior ao valor recomendado pela classificação visual que como já foi referido é de 21MPa.

Quadro 4.10 – Valores estatísticos para a tensão de flexão do sub-lote “Aprovadas”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
$f_{m,0}$	σ	CV	$f_{m,0,k}$	$f_m \text{ máx}$	$f_m \text{ min}$
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
36,3	12,5	34,5	15,8	60,0	15,8

4.5.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

O quadro 4.9 e a figura 4.14 apresentam os valores obtidos no tratamento estatístico e a representação gráfica que traduz o valor do módulo de elasticidade para cada viga aprovada.

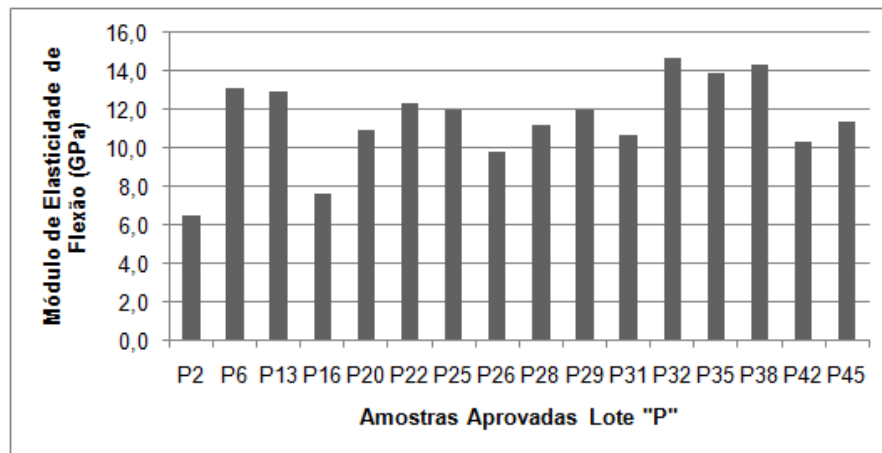


Fig.4.14 – Módulo de elasticidade do sub-lote “Aprovadas”

Pelo quadro 4.11 aferimos que o módulo de elasticidade médio da amostra é de 11,5GPa valor acima do limite recomendado, 8GPa. A variabilidade da amostra é de 19,6%, o que quando comparada com a encontrada no lote de amostras completo resulta uma franca melhoria. Isto advém do valor médio ter subido e o valor para o desvio padrão ter descido ligeiramente. Com a divisão da amostra em “Aprovadas” conseguiu-se aproximar esta característica mecânica, se bem que ainda muito longe de se poder considerar que a amostra apresenta homogeneidade.

Quadro 4.11 – Valores estatísticos para o módulo de elasticidade do sub-lote “Aprovadas”

Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação	Valor Característico	Máximo	Mínimo
E_{mean}	σ	CV	E_k	$E_{máx}$	E_{min}
(GPa)	(GPa)	(%)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
11,5	2,2	19,6	7,8	14,7	6,5

4.6. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

4.6.1. MASSA VOLÚMICA

O parâmetro massa volúmica é o que contribui menos na classificação visual, ou seja não tem um peso decisivo quando comparado com os defeitos como nós e fendas.

Tanto no lote completo como no sub-lote das “Aprovadas” os valores são satisfatórios, dado o coeficiente de variação se situar abaixo dos 10%. Verifica-se no entanto que o valor médio para a massa volúmica é maior no lote completo ($599,1\text{Kg/m}^3$) que no sub-lote das amostras “Aprovadas” ($586,2\text{ kg/m}^3$). Isto traduz-se num aumento da variância das amostras, passando dos 7,7% para os 9,5%.

Um outro aspecto a referir é a amplitude dos intervalos entre os valores máximos e mínimos obtidos para os dois lotes. No lote completo o valor máximo registado foi de $693,4\text{Kg/m}^3$ e no das “Aprovadas” foi de $670,5\text{Kg/m}^3$, sendo o valor mínimo obtido igual nos dois lotes em estudo, $478,2\text{Kg/m}^3$.

4.6.2. PRINCIPAIS TIPOS DE ROTURA

O tipo de rotura que melhor caracteriza o lote em estudo é rotura por flexão. A maior parte das vigas rompeu dentro da área da flexão circular, ou seja entre os pontos de aplicação da carga. A presença de nós de grandes dimensões ou ainda a presença de fendas já pré existentes em pontos singulares de algumas vigas, contribuíram para que a rotura dessas vigas se desse nesses pontos.

As roturas frágeis observadas ocorreram em vigas “Aprovadas”, como foi o caso da viga P6 que sofreu uma rotura frágil por flexão, induzida possivelmente por um defeito interno, e ainda a viga P35 que sofreu uma rotura por tracção perpendicular na zona traccionada. A viga P13 apresentou um comportamento algo frágil e a carga atingiu os 8KN (valor relativamente baixo).

Muitas das vigas “Rejeitadas” acabaram por revelar um bom comportamento à flexão, aguentando valores de tensão consideráveis. Isto vai de encontro a algumas das conclusões obtidas na campanha experimental de 2009, ou seja que o método “Amorim Faria” apresenta graves lacunas nos critérios presentes para a classificação visual de madeira antiga, uma vez que muitas das vigas que foram classificadas como “Rejeitadas” (dado aos defeitos presentes nas vigas, principalmente presença de nós de grandes dimensões, fendas e ataques biológicos activos) acabaram por sustentar bons valores de carga. Além disso, outras vigas que foram classificadas como “Aprovadas”, mas que apresentaram valores de carga admissíveis muito baixos.

As vigas P22 e P26 retratam exemplos de vigas “Aprovadas” pelo método de classificação, mas que revelaram mau desempenho nos ensaios. Nestas vigas, as roturas precoces deveram-se à existência de micro-fendas na face inferior na zona de flexão circular que não foram possíveis de detectar na inspecção visual e que contribuíram para a rotura das vigas por esse ponto (progressão rápida da fenda).

4.6.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Após a realização dos ensaios, a tensão de flexão é o parâmetro que apresenta maior variabilidade de valores. Isto resulta provavelmente de defeitos internos que não são detectáveis por inspecção visual e ainda pelas características físicas inerentes à espécie botânica em estudo, sendo que as amostras traduzem sempre uma grande diferença face ao valor imposto pelo método de classificação visual.

Como já foi referido o valor característico aconselhado para aprovação no que se refere a tensão de flexão, pelo método “Amorim Faria” é de 21MPa. Acontece que os valores obtidos para os lotes em estudo situam-se muito abaixo do valor recomendado.

Analisando os valores estatísticos obtidos para o lote completo, obteve-se que o valor característico da amostra de 9,2MPa (a amplitude entre este valor e o aconselhado é de 11,8MPa). O coeficiente de variação para este lote é de 42.1% o que representa um elevado grau de incerteza quanto à segurança das vigas face aos esforços de flexão.

Para o sub-lote de amostras “Aprovadas”, estes valores melhoram ligeiramente, sendo que o coeficiente de variação diminui ligeiramente (34,5%) e há um aumento para o valor de tensão característico (15,8MPa). Embora exista uma melhoria nos resultados para o sub-lote das “Aprovadas”, estes valores continuam a revelar grande incerteza e insegurança para este tipo de esforços.

4.6.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Considerando os resultados obtidos do lote completo para este parâmetro verifica-se uma elevada dispersão de valores entre o valor máximo e mínimo (15,2GPa e 2,6GPa respectivamente). Daqui resulta que a amplitude do intervalo entre os extremos é de 12,6GPa. O valor médio é de 10,6GPa, valor ligeiramente acima do valor médio admitido pelo método de classificação visual. O desvio padrão representa 27, 6% da média, sendo um valor elevado e que causa alguma apreensão sobre a homogeneidade da amostra. O valor característico para o módulo de elasticidade para este lote é assim de apenas 5,8GPa.

Para o sub-lote das “Aprovadas” estes valores apresentam algumas melhorias o que leva a crer que a não consideração das vigas “Rejeitadas” tornou a amostragem mais homogênea, ou seja que houve uma menor dispersão de valores obtidos para cada viga referentes ao módulo de elasticidade. O valor característico para o módulo de elasticidade subiu para 7,8GPa e o valor médio para 11,5GPa. O desvio padrão é de 2,2GPa e representa 19,6% da média. Embora estes valores estejam mais próximos, o grau de variabilidade continua a ser elevado e preocupante, pelo que todas as conclusões que se possam retirar deste conjunto de valores estatísticos devem ser cuidadosamente analisadas. Por fim, a diferença entre o valor máximo e o mínimo encurtou para 8,2GPa, ainda assim um valor demasiado elevado.

4.6.5. RELAÇÃO ENTRE CLASSIFICAÇÃO VISUAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS

Como já foi referido no capítulo anterior referente à campanha de 2009, a classificação visual *in situ* é um processo complexo e que requer um grande conhecimento sobre a espécie botânica em estudo, assim como conhecimentos técnicos e científicos adequados que permitam ao técnico uma correcta avaliação / classificação da peça em análise.

A principal dificuldade resulta da pouca margem de manobra que o método de classificação visual *in situ* para madeira antiga “Amorim Faria” impõe ao avaliador. A maior parte das vigas cuja classificação atribuída foi a “ Rejeitada”, não cumpria apenas um dos limites para os defeitos presentes no método. A maior parte das vigas “Rejeitadas” foram reprovadas pelas dimensões dos nós ou pelo comprimento de fendas ou ainda pelo ataque biológico que em algumas vigas se fazia sentir. Posteriormente e experimentalmente verificou-se que nas vigas em que apenas um dos defeitos era ultrapassado, de um modo geral apresentaram um bom comportamento no ensaio à flexão. Quando a viga era “Reprovada” por um conjunto de defeitos, normalmente verificou-se que havia compatibilidade entre a classe visual atribuída e o deficiente comportamento mecânico verificado no decorrer do ensaio.

Daqui advém que a classe atribuída pela inspecção visual não pode depender apenas da reprovação num único e determinado defeito, mas sim na combinação de conjunto de defeitos que se mostrem ou sobre os quais seja expectável que possam levar a um mau desempenho para os esforços à flexão.

Um outro aspecto que vale a pena reflectir é sobre a atribuição da classe “Aprovadas” a determinadas vigas, cujo desempenho se revelou insatisfatório e algo preocupante dado a fraca capacidade de absorção de carga, ou seja a tensão resultante ser muito inferior ao valor fixado no método de classificação visual (21MPa). Este facto pode estar relacionado com o facto de na madeira ardida se criarem micro-fendas que sendo imperceptíveis a “olho nu”, no decorrer do ensaio se mostram de uma extrema gravidade para o comportamento da viga.

O método “Amorim Faria” revela-se assim um método facilmente falível e com pouca consistência. Quando apenas um critério não é cumprido na inspecção visual e se atribui a classe “Rejeitada” a uma amostra, este procedimento mostra-se não ser válido. Este método depende muito da sensibilidade do executor, não se devendo analisar individualmente os defeitos mas sim o seu conjunto de forma a ser atribuída a classe num aspecto global e não a pontos singulares da amostra.

Em suma, a realização desta campanha experimental mostrou que a relação classificação visual *in situ*/ propriedades mecânicas se revela de muito difícil previsibilidade. Não é possível assim assumir uma correspondência infalível entre a classe atribuída por uma qualquer classificação visual *in situ* e a as propriedades mecânicas avaliadas pelos ensaios à flexão.

5

Interpretação de Resultados

5.1. VIABILIDADE DA CLASSIFICAÇÃO VISUAL *IN SITU* DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA EXISTENTE

A validação do método de classificação visual *in situ* “Amorim Faria” para madeira antiga é um dos elementos chave da realização desta dissertação. Como já foi apresentado nos capítulos anteriores, o método de classificação visual de peças de madeira antiga proveniente de madeira aproveitada de incêndio apresenta muitas particularidades. A correcta classificação visual neste tipo de madeiras está intimamente ligada ao bom senso e experiência do classificador.

A inspecção visual que determina a classificação atribuída às peças de madeira e que se baseia na dimensão, tipo e forma dos defeitos presentes é difícil e apresenta um risco elevado quando usada como único procedimento para prever o comportamento estrutural sem recorrer a procedimentos de ensaio destrutivos ou a equipamentos de inspecção não destrutiva.

Este método depende muito da experiência de observação da pessoa/entidade envolvida no processo, já que a consideração de outros factores (como o posicionamento relativo dos defeitos em determinadas zonas da peça) e a sua importância no comportamento geral da peça, face a esforços concretos exige experiência anterior e um vasto conhecimento na área em questão.

Tendo em conta os resultados e observações obtidos nas duas campanhas experimentais realizadas em 2009 e 2010, pode-se afirmar que o parâmetro massa volúmica não é um critério determinante, quando comparado com defeitos mais relevantes tais como os nós e as fendas.

Verificou-se ainda que na classificação visual *in situ* apresentam especial importância os defeitos observáveis, como os nós e as fendas. No entanto, mais uma vez, importa salientar que não é apenas o tamanho e geometria destes defeitos que têm importância no desempenho mecânico da viga, mas também a sua localização no elemento, aspecto que o método “Amorim Faria” não considera.

A dimensão dos nós não constitui um critério que por si só possa aprovar/ rejeitar uma determinada peça. A sua localização na peça, o facto de se situar em zonas comprimidas ou traccionadas, a relação nó/inclinação do fio ou nó/ fenda, parecem ser aspectos que contribuem mais para a correcta rejeição/ aprovação da peça do que exclusivamente a dimensão do nó.

Um outro ponto que merece reflexão é que quando se rejeita uma determinada peça usando como critério um único parâmetro, avaliado pela classificação visual, que seja excedido, os resultados obtidos não correspondem muitas vezes ao comportamento que essa peça apresenta no decorrer do ensaio experimental.

Quanto às fendas, embora o seu comprimento e localização na peça sejam de enorme relevância para o comportamento da peça quando solicitada a determinados esforços, torna-se muito importante descobrir fissuras que atravessem completamente a viga entre duas faces, uma vez que isso implica uma redução muito significativa da altura útil, e uma resistência muito inferior ao estimado.

Rejeitar peças apenas pela presença de ataques biológicos activos é também um procedimento pouco correcto na medida em que, se ocorrer um tratamento adequado de forma a travar o ataque, não se justifica eliminar a viga na perspectiva exclusiva de resistência estrutural. Haverá apenas que acautelar a questão da dimensão da secção residual activa.

Torna-se pois importante realçar que o método de classificação visual deve incidir numa avaliação global de defeitos. Ou seja deve-se classificar negativamente uma peça quando esta apresenta vários critérios de defeitos que são excedidos e não quando apenas um não é satisfeito. É de salientar que o risco de falhas na classificação visual é elevado, visto não ser possível identificar nós intrínsecos, fendas internas e ainda a integridade do lenho residual.

Em conclusão, parece seguro dizer-se que o critério da massa volúmica mínima deverá ser excluído do método “Amorim Faria” de classificação de madeira antiga com base na limitação de defeitos.

Na classificação visual efectuada sobre as amostras em estudo, foi unânime que os defeitos que mais contribuíram para a rejeição ou aprovação das amostras foram a dimensão dos nós e o comprimento das fendas. É de realçar que na campanha de 2010 a presença de ataques biológicos activos também contribuiu para a rejeição.

Nos dois casos de estudo nesta dissertação, verificou-se que a classificação atribuída às amostras mediante a inspecção visual efectuada foi, como se pode observar na figura 5.1, muito díspar. Em 2009 a percentagem de amostras “Aprovadas” rondou os 69%. Isto indica que a amostra apresentava qualidade geral e maior integridade física e que a presença de defeitos não era tão significativa quanto a observada nas amostras estudadas em 2010. Um outro factor prende-se com o facto de o classificador não ser o mesmo, o que em pequenos aspectos pode eventualmente fazer diferença.

Em 2010 verificou-se que o número de amostras “Rejeitadas” foi praticamente igual ao número de amostras “Aprovadas” em 2009. Em 2010 apenas 32% das amostras reuniram condições de serem “Aprovadas”. Este valor deveu-se sobretudo ao facto das amostras evidenciarem a presença de muitos defeitos e alguma degradação resultante do fogo a que foram sujeitas.



Fig.5.1 – Amostras 2009 vs amostras 2010

A aplicação de um método de classificação visual a madeiras antigas por observação *in situ* é uma tarefa árdua e difícil de enquadrar nas classes definidas (*Aprovada* ou *Rejeitada*) tendo apenas presente as dimensões físicas dos defeitos existentes; a visualização do estado interior, quer por meios directos de observação quer recorrendo a ensaios não destrutivos, e a consideração do posicionamento

relativo dos defeitos na peça constituem dois parâmetros importantes e que não são considerados por este método.

Do que anteriormente foi exposto, torna-se demasiado inseguro avaliar propriedades mecânicas de madeira existente exclusivamente recorrendo a métodos de classificação visual. O comportamento e a resistência que uma dada peça apresenta é muito variável, como se verificou com os ensaios realizados, e nem sempre os comportamentos e valores obtidos para as amostras foram de encontro com a classificação que lhes foi atribuída. Aliás, os resultados mostram uma grande variabilidade e elevada diferença entre os valores médios e os valores de referência (sobretudo no lote ensaiado em 2010).

Em suma, o método de classificação visual “Amorim Faria” não pode ser usado de forma completamente segura na perspectiva de aprovar/rejeitar. No entanto, os critérios indicados pelo método são muito úteis para excluir as vigas de muito fraca integridade física, ou seja peças que possuam a presença de nós de grandes dimensões, fissuras, fendas repassadas e ainda a presença activa ou inactiva de ataque biológico.

5.2. MASSA VOLÚMICA

O parâmetro massa volúmica foi aquele que apresentou uma maior aproximação entre o valor de referência e os valores médios obtidos. Sabia-se que, antes da determinação da massa volúmica, a madeira de carvalho foi obtida a partir de vigas e de outros elementos estruturais de um edifício consumido por um incêndio. A determinação da massa volúmica permitiu concluir, que a madeira das amostras esteve submetida às mesmas condições ambientais na sua génese e mais tarde enquanto parte dos elementos estruturais do edifício em questão. De uma forma geral, permite inferir que se encontra completamente estabilizada em termos de secagem/teor de água.

O fogo, registado no edifício de onde surgiu a madeira para a composição das amostras, pode ter influenciado os valores da massa volúmica dos lotes, na medida em que a decomposição em gases inflamáveis pode conduzir a perdas de integridade com a potencial deterioração de material da secção residual (diminuição da massa das amostras). Isto pode justificar o facto dos valores médios dos lotes completos “G” e “P” ($\rho = 598 \text{ kg/m}^3$ $\rho = 599,1 \text{ kg/m}^3$) serem próximos do limite mínimo fixado na proposta de classificação visual para a espécie botânica de Carvalho ($\rho = 600 \text{ kg/m}^3$). A aplicação deste critério a cada amostra individual poderia conduzir à rejeição, em termos de classificação visual, da maioria das amostras dos lotes “G” e “P”, ensaiados à flexão e previamente submetidos a inspecção visual pelo método “Amorim Faria”, caso o critério que estipula um valor mínimo para a massa volúmica fosse considerado rígido e eliminatório, o que não se adoptou neste estudo.

Analisando a figura 5.2, observa-se que para o sub-lote das “Aprovadas”, verifica-se que a massa volúmica desce face ao valor do obtido para o lote completo sendo agora de $586,2 \text{ kg/m}^3$. Nas amostras “Aprovadas” de 2009 verifica-se um fenómeno semelhante, ou seja, há também uma diminuição do valor médio da massa volúmica para estas amostras, obtendo-se o valor de $596,8 \text{ kg/m}^3$.

Considerando o que foi exposto está-se em condições de afirmar que a massa volúmica é um parâmetro cuja importância na classificação visual é praticamente nulo. Há defeitos que revelam um peso fundamental na classificação, é o caso dos nós e das fendas. Na amostra de 2010, dezoito vigas “Rejeitadas” possuíam massa volúmica acima dos 600 kg/m^3 , tendo no entanto estas sido “Rejeitadas” devido às dimensões dos nós ou ao comprimento das fendas, sendo estes os parâmetros decisivos para a classificação atribuída.

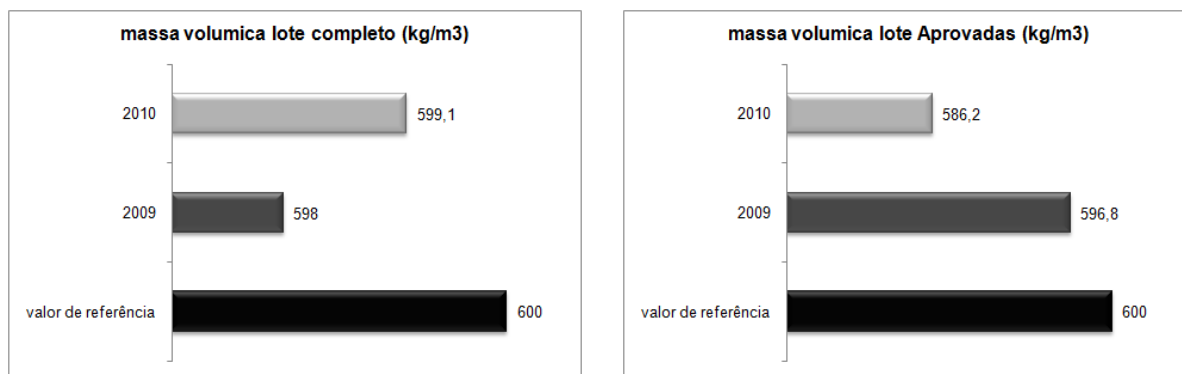


Fig.5.2 – Massa volúmica lote completo vs lote das “Aprovadas”

Devido à pouca bibliografia sobre madeira proveniente de incêndio, recorreu-se a estudos sobre madeira modificada por acção do calor de forma a estabelecer um paralelismo entre as mudanças nas propriedades físicas e mecânicas que acontecem nestes dois tipos de madeira. De acordo com o encontrado na bibliografia, verifica-se que a madeira modificada termicamente apresenta massa volúmica inferior ao valor apresentado na madeira de origem. Este facto resulta das reacções químicas ao nível da celulose que se vão registando mediante o tempo de exposição e temperatura.

A perda de massa sofrida pelas madeiras tratadas termicamente pode estar relacionada com a pirólise leve e/ou deterioração dos polímeros das paredes das células, especialmente das hemiceluloses. Esteves e Pereira (2009), acreditam que a redução da massa da madeira após o tratamento térmico, tem como razões a degradação da hemicelulose em produtos voláteis e a evaporação dos extractivos.

Como se pode verificar, os resultados obtidos para a madeira proveniente de incêndio corroboram com os resultados obtidos em estudos realizados sobre madeira modificada por acção do calor. Ou seja, existe uma perda de massa e por conseguinte uma diminuição da massa volúmica, uma vez que o volume da peça permanece constante.

5.3. MECANISMOS DE ROTURA

Os mecanismos de rotura resultam das deformações elásticas e permanentes observadas à escala dos átomos, não sendo acompanhadas por quebras nas ligações internas. Quando a deformação imposta leva à destruição dessas ligações, forma-se a rotura e criam-se descontinuidades superficiais.

A madeira é um meio heterogéneo, de natureza orgânica, cuja estrutura básica é formada pelo arranjo de células. As paredes celulares são, por sua vez, formadas por feixes de celulose (fase cristalina) unidos pela lenhina (fase não-cristalina).

No caso da madeira, as deformações elásticas são devidas às deformações reversíveis das células, fortemente influenciadas pelo teor de água. Nas madeiras é difícil separar os mecanismos de deformação permanente dos de rotura, seja porque as deformações permanentes macroscópicas resultam de micro-roturas, seja porque muitas vezes a rotura macroscópica aparece antes que deformações apreciáveis sejam originadas.

De qualquer modo, o mecanismo principal de deformação plástica da madeira é o escorregamento entre as células. A rotura dá-se nas cadeias de celulose, nas fibras e por perda da coesão entre fibras ocasionada por solicitação na direcção perpendicular. [24]

Após a explicação da causa e forma dos mecanismos de rotura na madeira, segue-se um breve esclarecimento dos fenómenos de rotura que foram possíveis de observar no decorrer dos ensaios que constituíram as campanhas experimentais.

No Capítulo 3, particularmente no ponto 3.6.2, falou-se de um modo geral dos mecanismos de rotura registados pelas amostras ensaiadas em 2009, explicando a rotura que seria expectável e que foi comum a grande parte das vigas ensaiadas. Contudo, tal como se disse, verificaram-se roturas frágeis por corte, mesmo para pequenas tensões aplicadas, motivando uma certa apreensão e conduzindo a uma postura de desconfiança face à aplicação de madeira ardida em estruturas, já que algumas destas vigas foram “Aprovadas” (G4, G10, G18, G51).

Outras vigas, que exibiram mau comportamento à flexão com roturas frágeis, evidenciavam sinais visuais menos agradáveis (combinações desfavoráveis de defeitos naturais) detectados pela inspecção realizada antes de cada ensaio. Estes sinais de fragilidade faziam adivinhar comportamentos menos resistentes mas sem indícios que pudessem apontar para um prognóstico preocupante caracterizado em traços gerais por roturas por corte.



Rotura frágil por corte



Rotura induzida por defeito



Rotura dúctil com deslocamento das fibras



Rotura localizada numa zona de tracção

Fig. 5.3 – Exemplos de roturas evidenciadas nas amostras de 2009 (Pereira, 2009)

Dado o que foi apresentado nos dois parágrafos anteriores, poder-se-ia pensar que a madeira ardida teria maior propensão para roturas frágeis por corte, no entanto tendo em conta o que foi exposto no ponto 4.6.2, esta ideia revela-se falsa. Em 2010, nos quarenta e oito ensaios válidos não se verificaram roturas frágeis por corte. As roturas mais frequentes foram por flexão e situaram-se na zona de flexão circular; houve ainda outras que tiveram origem em defeitos existentes na parte traccionada da peça.

As roturas frágeis que ocorreram foram por flexão, induzidas por defeitos internos e por tracção longitudinal na zona traccionada, são exemplo disso as vigas P6 e P35. Na figura 5.4. estão presentes alguns dos tipos de rotura referidos anteriormente.



Rotura por fissura pré-existente



Rotura numa zona de tracção



Rotura frágil em flexão



Rotura induzida por defeito

Fig. 5.4 – Exemplos de roturas evidenciadas nas amostras de 2010

Em suma, os mecanismos de rotura ocorridos não seguiram a mesma lógica nas duas campanhas experimentais. Em 2010 foram bastante mais regulares e decorreram mais próximo do expectável. Em 2009 ocorreram algumas roturas frágeis por corte, que na altura, não se conseguiram explicar e que hoje se pensa estarem ligados a defeitos “imperceptíveis” no interior das peças, em secções determinantes e que estavam associadas a zonas muito localizadas com resistência mecânica muito baixa (provavelmente associada a roturas nas cadeias das fibras de celulose), associadas provavelmente ao incêndio, induzidas ou não pelas peças metálicas muito aquecidas.

Convém não esquecer que a variação do esforço que uma peça de madeira pode suportar é afectada de uma forma expressiva pela direcção da carga em relação à direcção das fibras, pela massa volúmica, pelo teor de água e pelos defeitos.

5.4. TENSÃO DE FLEXÃO

O parâmetro tensão de flexão é o que maior variabilidade apresenta, obtendo-se valores muito diferentes quando se está perante o lote completo e o sub-lote das “Aprovadas”. Quando se efectua a classificação visual de uma amostra, procura-se rejeitar aquelas cujo contributo para a resistência do

lote seja mau, sendo pois de esperar que as amostras “Aprovadas” conduzissem a valores sempre superiores aos dos valores de referência (21MPa), pois só assim o método de classificação apresentaria credibilidade satisfatória.

Tendo por base a figura 5.5, verificou-se que, para o lote completo de 2009, o valor de tensão obtido (22,8MPa) foi acima do valor de referência, o que indica uma certa insegurança caso se considere o valor proposto como representativo da espécie de Carvalho. Isto torna-se evidente quando se faz uma avaliação do agregado de resistências singulares à flexão já que se verifica a existência de doze provetes com resistência inferior a 21,0MPa, representando 23% do número total de amostras. No entanto, quando se analisam as “Aprovadas”, verifica-se que o valor da tensão diminuiu significativamente, chegando mesmo a ser menor em 8,3MPa comparativamente com o valor observado para o lote completo. Este facto, não vai de encontro à premissa inicial de que as vigas “Aprovadas” deveriam assegurar a valores que estariam mais do lado da segurança.

Em 2010, pelo contrário, com a divisão entre as “Rejeitadas” e as “Aprovadas” pela classificação visual conseguiu-se um aumento significativo no valor da tensão de flexão característica. Para o lote completo o valor obtido era muito baixo, não atingindo os 10MPa, ficando muito abaixo dos 21MPa recomendados para a espécie botânica em estudo (importa referir que 27,1% das amostras possuía valores tensão abaixo dos 21MPa). Por seu turno no lote das “Aprovadas”, o valor da tensão de flexão é já de 15,8MPa, ou seja, a separação contribuiu para a diminuição das amostras com valores de tensão abaixo do limite mínimo recomendável. Nas dezasseis vigas que constituíam a sub-amostra apenas duas possuíam valor de tensão inferior ao valor recomendado pelo método “Amorim Faria”.

Estimar o parâmetro tensão de flexão por métodos de classificação visual *in situ*, revela-se de um enorme risco. A imprevisibilidade do comportamento da amostra quando submetida à flexão parece ser demasiado elevada para arriscar no aproveitamento de madeira ardida com finalidade estrutural, uma vez que não se conseguiram arranjar indicadores fiáveis que pudessem prever a resposta de uma percentagem considerável das amostras estudadas.

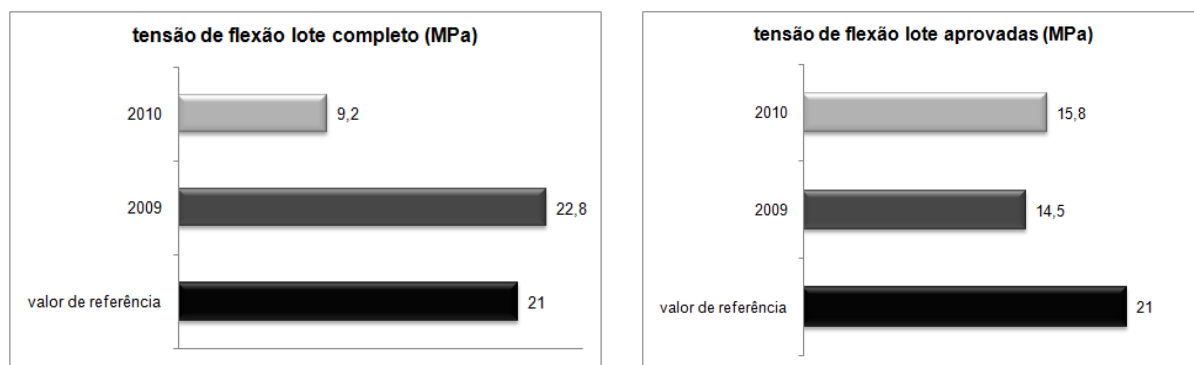


Fig.5.5 – Tensão de flexão lote completo vs lote das “Aprovadas”

Analogamente, para a madeira obtida por processos térmicos, verifica-se que a acção do calor tem forte influência em algumas propriedades mecânicas. O efeito no módulo de elasticidade é pequeno, mas a diminuição da tensão de flexão pode ser significativa. A madeira torna-se mais quebradiça com a deterioração das propriedades de fractura devido à perda de polissacarídeos amorfos, segundo estudos realizados por Esteves e Pereira (2009).

Também Boonstra et al. (2007) explicam que a redução da tensão de flexão tem origem nas mudanças do teor e estrutura da hemicelulose com o tratamento térmico. O aumento da temperatura e/ou do tempo de tratamento causa uma redução mais acentuada desse polímero com correspondente perda de resistência. Também a resistência à flexão é uma combinação das tensões internas na madeira (tensão

de tracção, compressão e cisalhamento), de maneira que também deve ser explorado como essas forças são afectadas pela degradação da hemicelulose.

Tendo em atenção que as causas para a perda de resistência apontadas nos parágrafos anteriores foram fundamentados em ensaios realizados sobre madeira modificada por acção do calor, pode-se afirmar que as causas da perda de resistência na madeira ardida são as mesmas. A madeira proveniente de incêndio é exposta a fluxos de calor que não são controlados, logo as alterações a nível da estrutura química poderão ser iguais ou maiores, comparativamente com as alterações observadas na madeira modificada.

5.5. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Dos três parâmetros avaliados nas campanhas experimentais, aquele que menos é afectado com a selecção realizada pelo método de classificação visual é o módulo de elasticidade. Como se pode observar na figura 5.6 os valores obtidos, tanto para os lotes completos como para os sub-lotes das “Aprovadas”, situam-se acima dos 8GPa, valor tomado como referencia no método “Amorim Faria”.

Analisando os dados estatísticos referentes a 2009 para o lote completo, verifica-se que o valor médio de 9,9GPa apresenta uma certa segurança. Apenas 11,5% das amostras que constituem o lote apresentaram valor para o módulo de elasticidade inferior a 8GPa. A sub-divisão do lote em “Aprovadas” mostrou-se benéfica, pois além de haver um pequeno aumento no valor médio deste conjunto (10,1GPa), conseguiu-se homogeneizar os valores que contribuíram para este valor médio, existindo apenas quatro vigas neste lote que apresentavam valor de módulo de elasticidade inferior ao limite imposto pelo método de classificação visual.

Em 2010, os dados seguiram a mesma linha de 2009, ou seja, para o lote completo o valor obtido para o módulo de elasticidade foi de 10,6 GPa, enquanto para as “Aprovadas” o valor obtido foi de 11,5 GPa. Estes valores traduzem que a classificação visual efectuada conseguiu eliminar as vigas cujos valores de módulo de elasticidade se situavam abaixo dos 8GPa. Quando se observa o quadro 4.9 verifica-se que nas dezasseis vigas “Aprovadas” apenas duas estão nas condições acima descritas.

Face aos valores médios obtidos para os lotes “G” e “P” pode-se dizer que, mesmo para madeira ardida, o valor apresentado na proposta de classificação visual satisfaz as exigências de margem de segurança. Por outro lado, os valores mínimos alcançados para o módulo de elasticidade em flexão são inferiores ao valor médio definido na proposta. Este facto era expectável uma vez que o comportamento resistente de alguns provetes demonstrou roturas frágeis, isto é, atingiram a tensão máxima sem qualquer tipo de aviso prévio (nomeadamente deformações), enquanto outras exibiram deformações consideráveis na fase elástica de aplicação de carga atingindo o instante da força de rotura de forma bem visível.

Em termos gerais, a capacidade de deformação evidenciada para a madeira antiga é variável, não se verificando grande dispersão de valores face à média do conjunto mas evidenciando comportamentos bem distintos, dentro dos diferentes lotes. A grande amplitude de valores justifica-se pela presença de casos extremos, geradores de mais um sinal de alerta a respeito da madeira antiga e ardida, mas que vai de encontro ao referido na resistência à flexão, quando se descreveu a presença de comportamentos frágeis.

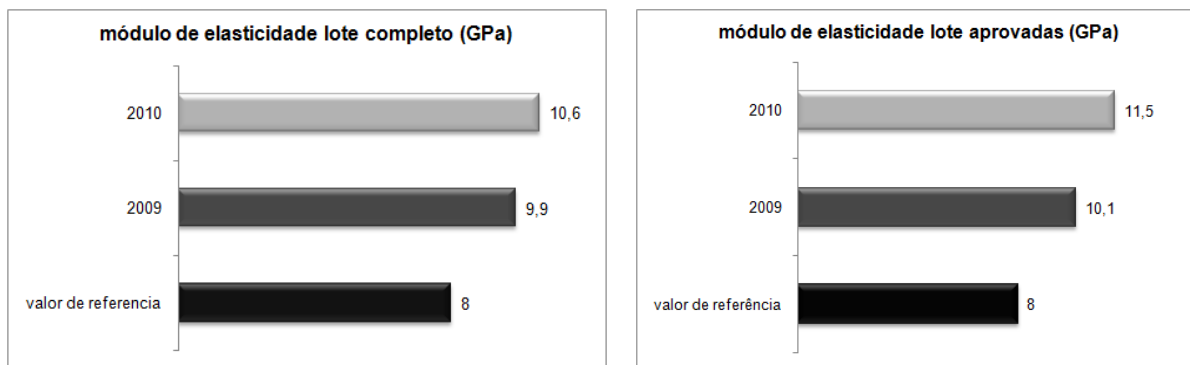


Fig.5.6 – Módulo de elasticidade lote completo vs lote das “Aprovadas”

Recorrendo a estudos sobre o módulo de elasticidade em madeira modificada, Gunduz et al. (2009) justifica que o acréscimo no valor do módulo de elasticidade resulta pelo aumento das ligações cruzadas (vinculação) na rede de lenhina, uma vez que é esperado que esse fenómeno melhore a estrutura rígida em torno das micro-fibras de celulose e resistência da lamela média (camada gelatinosa existente entre as paredes celulares das células vizinhas que as mantém ligadas). Também outro fenómeno que pode afectar o módulo de elasticidade é a propriedade termoplástica da madeira, acima de certa temperatura, as características físicas da hemicelulose, lenhina e celulose mudam para um estado similar a borracha. No arrefecimento as fases dessas componentes da estrutura química tornam-se mais rígidas e a estrutura do polímero pode ser alterada, o que provavelmente afecta a interacção entre as principais componentes da madeira e, por conseguinte, as propriedades de resistência.

Esteves e Pereira (2009) inferem que o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da cristalinidade da celulose e com a redução do teor de água. O efeito da cristalinidade prevalece no início do tratamento, mas com a sua continuidade a degradação térmica é dominante, levando a uma redução dessa variável.

Da exposição realizada nos dois parágrafos anteriores, resulta que o aumento no valor do módulo de elasticidade quer para o lote completo quer para o lote “Aprovadas” poderá ser causada pela possível mudança da estrutura química. Deve-se ter sempre em conta que as conclusões aqui apresentadas resultam de uma aproximação entre os valores obtidos nas duas campanhas experimentais, em estudo nesta dissertação, para a madeira proveniente de incêndio e aqueles que foram obtidos no estudo de madeira modificada por processos térmicos.

5.6. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MADEIRA PROVENIENTE DE INCÊNDIO – ALGUMAS REFLEXÕES

A madeira submetida a temperaturas elevadas sofre uma redução, em média, de 40% nas propriedades mecânicas. Isto acontece fundamentalmente porque a acção do calor induz alterações na estrutura química da madeira. A madeira perante a acção do calor tem maior propensão a tornar-se mais quebradiça, uma vez que as alterações a nível da estrutura química provocam quebras nas ligações entre as fibras que constituem o lenho. Essas alterações são fortemente dependentes da temperatura e tempo de exposição à fonte de calor.

É pois de esperar que na madeira proveniente de incêndio as alterações na estrutura química e nas propriedades mecânicas sejam semelhante às verificadas na madeira modificada. Há no entanto que

realçar, que na madeira proveniente de incêndio estas alterações podem ter proporções maiores uma vez que não é possível controlar a temperatura nem o tempo de exposição a que a madeira é sujeita.

Atendendo ao exposto nos pontos anteriores do presente capítulo, importa realçar que a realização das duas campanhas experimentais permitiu concluir que avaliar propriedades mecânicas exclusivamente por método de classificação visual mostra-se demasiado perigosa.

A grande dificuldade da madeira proveniente de incêndio na classificação visual é que a possível presença de fendas internas e a perda de secção útil, conduz a comportamentos mais frágeis e inesperados nas amostras que reúnem condições de aprovação. Isto acontece porque visualmente esses aspectos não são detectáveis mas que se revelam graves no comportamento da peça para os esforços a que é submetida.

A falha na classificação visual, nomeadamente, a impossibilidade de identificar nós internos, fendas repassadas de pequena dimensão e fendas ou falhas de integridade no interior das peças em zonas relevantes, são aspectos que aumentam a imprevisibilidade do comportamento da amostra. Na madeira que provém de incêndio este risco aumenta significativamente, porque formam-se micro-fendas que são imperceptíveis a olho nu. Quando as vigas são solicitadas à flexão estas micro-fendas revelam-se graves para a segurança da peça, dado romperem para valores de carga baixos nas zonas onde estas se situam.

Um aspecto que influencia a integridade física das amostras é a posição dos pregos ou acessórios metálicos e das micro-fissuras nas amostras. No decorrer dos ensaios, houve roturas que tiveram origem nesses pequenos orifícios ou fendas e que quando começavam a abrir, as fibras de madeira muitas das vezes apresentavam uma cor escura ou mesmo preta. A viga P 36 exemplifica um desses casos e pode ser observado na figura 5.7. Este aspecto assume importância na medida em que o aquecimento das peças metálicas ou a propagação do fogo por esses pequenos orifícios induzem graves lesões no lenho interior e que condicionam fortemente a capacidade resistente das peças.



Aspecto da amostra antes do ensaio



Aspecto da amostra após o ensaio

Fig.5.7 – Alterações da amostra P36 decorrentes do ensaio à flexão

Os defeitos que se revelaram mais críticos e que mais contribuíram para a rejeição das amostras foram a presença de nós de grandes dimensões, o comprimento de fendas e as fendas repassadas, nas amostras de 2010 um outro defeito que contribuiu para a rejeição foi a presença de ataque biológico activo.

Os métodos de classificação visual podem ser utilizados em complemento de outros métodos que permitam avaliar as propriedades mecânicas e comportamento da peça. O método aqui aplicado parece

apresentar bons resultados quando as vigas são “Rejeitadas” por vários defeitos e não apenas por um. Quando se rejeitam as vigas muito más, em que há um número significativo de requisitos que são excedidos, o comportamento demonstrado nos ensaios vai de encontro ao esperado pela classificação visual. No entanto, quando se rejeitam as amostras apenas por não ser cumprido um dos requisitos, o comportamento da viga por norma não corresponde ao que seria previsível esperar inicialmente para as vigas “Rejeitadas”.

Quanto às propriedades mecânicas, tal como na madeira modificada, a madeira proveniente de incêndio apresenta um grande grau de desconfiança face à sua capacidade resistente. Este facto advém das possíveis alterações na integridade de lenho, mas a principal causa está relacionada com as alterações na estrutura química, nomeadamente nas mudanças do teor e estrutura das hemiceluloses e ainda na perda de polissacarídeos amorfos que conferem resistência à madeira.

Tendo em conta aos resultados obtidos para a tensão de flexão, verifica-se que este é o parâmetro que mais variabilidade apresenta. O vasto espectro de resultados e comportamentos observados revela que a madeira proveniente de incêndio não apresenta credibilidade para ser usada a nível estrutural. Alias, a Finnish Thermowood Association no seu livro sobre madeira modificada [27] recomenda que madeiras tratadas por processos térmicos não sejam utilizadas a nível estrutural, corroborando assim com o perfil traçado para a madeira proveniente de incêndio e estudada no âmbito desta dissertação.

6

CONCLUSÃO

6.1. PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Após a exposição do trabalho realizado, nomeadamente das campanhas experimentais efectuadas no ano de 2009 e 2010 e dos respectivos resultados, é conveniente sintetizar as ideias principais que estão patentes nesta dissertação.

No capítulo dois procurou-se caracterizar a madeira incidindo nas suas singularidades e nas componentes que tornam a madeira num material tão especial. O estudo da sua composição celular, referindo a sua estrutura macro e microscópica, da sua composição química e dos defeitos presentes nas peças de madeira serviu para uma abordagem mais ambígua. Num campo mais particular, procurou-se esclarecer as alterações que a acção do fogo e do calor provocam na madeira e ainda definir dois conceitos fundamentais, a Resistência e a Reacção no que respeita à acção do fogo. Neste capítulo foi possível reter os seguintes aspectos:

- A madeira é um material de construção muito singular, com características muito próprias e com forte anisotropia;
- A composição da madeira a nível, macro e microscópico e a composição química varia consoante a família a que pertence a espécie botânica;
- A qualidade de uma peça de madeira é medida pelas características médias do lenho e pelo tipo, quantidade e distribuição de defeitos que apresenta;
- A acção do calor sobre uma peça de madeira provoca alterações na composição química;
- A degradação térmica da madeira depende significativamente da espécie botânica, dos anéis de crescimento e do teor de humidade do material;
- A madeira sujeita à acção do calor torna-se mais rígida e quebradiça, tendo um efeito redutor em algumas propriedades mecânicas;

Os capítulos três, quatro e cinco estão directamente ligados ao trabalho experimental efectuado e com os respectivos resultados. Uma das partes mais relevantes diz respeito ao tratamento estatístico dos resultados de ensaio das amostras “Aprovadas” pelo método de classificação visual *in situ* “Amorim Faria”, da campanha experimental realizada por Samuel Pereira no âmbito da sua dissertação [31]. O cruzamento desses dados com os resultados obtidos na nova campanha experimental realizada permitiu proceder de forma mais segura à validação do método de classificação visual.

As campanhas experimentais, descritas genericamente nos capítulos três e quatro, envolveram lotes de madeira antiga de carvalho proveniente de incêndio, que constituíram as amostras utilizadas na realização dos ensaios à flexão. Estes ensaios tiveram como finalidade a obtenção de valores

experimentais de duas propriedades mecânicas, a resistência à flexão e o módulo de elasticidade na direcção do fio.

O trabalho desenvolvido nas campanhas experimentais (capítulo três e quatro) contou ainda com a determinação da massa volúmica das amostras.

O principal objectivo traçado para as campanhas experimentais realizadas era a validação do método de classificação visual “Amorim Faria”, tanto pela aplicação dos critérios de limitação de defeitos às peças de madeira dos lotes ensaiados à flexão, como pela comparação entre os valores experimentalmente obtidos para as propriedades mecânicas apresentadas e os valores sugeridos na metodologia.

Detalhadamente, os principais resultados alcançados com o trabalho laboratorial efectuado são:

- O método de classificação visual de madeira antiga “Amorim Faria” é útil como indicativo da qualidade da amostra mas não pode ser usado para classificar como forma exclusiva;
- A massa volúmica não constitui um critério relevante para a classificação de peças de madeira antiga nas classes definidas por *Aprovada* e *Rejeitada*, podendo ser usado apenas como auxiliar de avaliação qualitativa global;
- O método precisa de uma revisão ao nível dos critérios definidos e da forma como se limitam os defeitos para efeitos de aprovação das amostras;
- O processo de classificação por inspecção visual *in situ* só deve ser efectuado por pessoas/entidades muito experientes e conhecedoras da temática dado que, se forem “Aprovadas” peças com defeitos graves, as roturas dão-se para valores muito baixos da resistência (exemplo as vigas P22 e P26);
- Os nós ocultos e fissuras no interior das peças, não visíveis na observação exterior, constituem o maior risco de classificação (provocam roturas inesperadas face ao aspecto visual exterior das peças, tal como aconteceu com a amostra P2);
- A propagação do fogo pelas fendas ou posição de pregos pode ser um aspecto demolidor, dado criar lesões internas, não detectáveis a olho nu;
- O calor provocado pelo incêndio fomenta alterações na estrutura química, reduzindo algumas propriedades mecânicas e isso reduz o interesse da madeira ardida na perspectiva da reutilização em elementos estruturais;
- A resistência à flexão é a característica mecânica que mais redução sofre devido à acção do calor, este facto corrobora com alguns estudos publicados e que foram consultados na elaboração desta dissertação, sendo referidos na bibliografia;
- O valor do módulo de elasticidade à flexão sofre um ligeiro aumento quando a madeira é submetida à acção do calor (de acordo com a referencia [11]);
- Pode-se também dizer que o modo de rotura é, em muitos casos, imprevisível devido à influência dos defeitos na resposta à solicitação, sobretudo dos nós e fendas;
- Para peças mais limpas (que se encontram menos afectadas por defeitos) a rotura em flexão ocorre em geral por rompimento das fibras de celulose na direcção do fio, traccionadas por efeito da solicitação e situada numa das secções da zona central, sujeita a flexão circular;

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O estudo desenvolvido nesta dissertação é apenas um pequeno contributo para a caracterização das madeiras antigas que provém de incêndio. Como tal e dada a dificuldade em encontrar bibliografia sobre o tema há ainda um longo percurso a percorrer e muito ainda a desenvolver e explorar.

Através desta dissertação, ficou mais ou menos demonstrado que a utilização de madeira ardida em estruturas apresenta um comportamento não confiável, no entanto ela pode ser usada, depois de limpa em outros usos e sobretudo interessa conhecer o seu desempenho e as alterações que sofre durante a exposição ao frio/ calor para melhor perceber quais os usos mais adequados a dar a este tipo de madeiras.

Mediante o exposto anteriormente parece ser apropriado continuar com a realização de novas campanhas experimentais que permitam identificar/caracterizar os modos de rotura mais frequentes em madeira ardida, assim como avaliar outras propriedades mecânicas que permitam definir mais particularidades das madeiras ardidas ou modificadas por acção do calor.

Sendo o fogo/calor uma acção que provoca grandes alterações ao nível da estrutura química, recomenda-se que se faça investigação microscópica sobre madeira ardida, de forma a conseguir-se interpretar as transformações que ocorrem e que podem interferir na qualidade da madeira quando usada como elemento estrutural.

Com a crescente preocupação da reabilitação dos edifícios e reutilização de materiais, torna-se fundamental conhecer a capacidade resistente que os elementos estruturais nestes edifícios apresentam. É importante ter um conhecimento profundo e seguro sobre as principais características físicas e mecânicas da madeira ardida, uma vez que esse conhecimento poderá levar à reutilização destas madeiras quer em elementos estruturais quer em elementos meramente decorativos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cruz, H., Nunes, L., *A madeira como material de construção*, LNEC
- [2] Carvalho, S., *Impregnação de Cor em Madeira*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2007.
- [3] Forest Products Laboratory, *Wood handbook-Wood as an Engineering Material*. Gen.Tech. Rep.FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service,Forest Products Laboratory, 1999
- [4] Society of Wood Science and Technology, teaching unit 2
- [5] Avallón, E.A., Baumeister III, T., *Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 10th edition Mc Graw-Hill, 1996
- [6] John G. Haygreen, Jim L. Bowyer, *Forest Products and Wood Science – An Introduction*, 3th edition, Iowa State University Press, 1996
- [7] NP180, *Anomalias e Defeitos na Madeira*, IPQ, 1962
- [8] Moedes, K., *Efeito da Retificação Térmica nas Propriedades Físico-Mecânicas e Biológica das Madeiras Pinus taeda e Eucalyptus grandis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, 2010.
- [9] Morais, S. A. L., Nascimento, E. A.; Melo, D. C., *Análise da madeira de Pinus oocarpa parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis*. Revista Árvore, 2005.
- [10] Morey, P., *O crescimento das árvores*, São Paulo: E.P.U, 1980.
- [11] Esteves, B. M.; Pereira, H. M. *Wood modification by heat treatment: a review*. BioResources, 2009.
- [12] Schaffer, E. L., *Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry, Douglas fir*. Journal of Testing and Evaluation, 1973.
- [13] Figueroa, M. J. M., *Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do Paricá*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- [14] Negrão J. H., *Estruturas em madeira*, textos de apoio, cursos de formação d.e.c-f.c.t.u.c. Coimbra, 2005
- [15] Figueroa, M. J. M., Morais, P. D., *Wood behavior at high temperatures: a review*, 2009.
- [16] <http://www.tria.pt/ppci/index.php?sc=biblioteca&page=N03-AT02>, 18/2/2010
- [17] <http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/taxa-de-carbonizacao-da-madeira-x-r>, 15/3/2010
- [18] <http://www.arauco.cl>, 1/3/2010
- [19] Proença, S., *Fundamentos dos mecanismos de deformação e ruptura*, Textos de apoio, São Carlos, 2001
- [20] Boonstra, M. J. et al., *Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents*. Annals of forest science, 2007.
- [21] Lopes Porto, J. *Segurança Contra Incêndios em Edifícios*, apontamentos aulas teóricas, FEUP, 2009

- [22] White, R.H., *Fire Resistance of Structural Composite Lumber Products*, Madison: Forest Products Laboratory, 2006
- [23] Rodrigues, T., O., *Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos*, Dissertação Mestrado em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, 2009.
- [24] Gunduz, G. et al., *The density, compression strength and surface hardness of heat treated hornbeam (Carpinus betulus) wood*. Maderas. Ciencia y Tecnologia, 2009.
www.scielo.cl/pdf/maderas/v11n1/art05.pdf 23/4/2010.
- [25] Silva, M. R.; Machado, G.O.; Junior, C. C. *Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas de Pinus elliotti*, encontro brasileiro em 80 madeira e estruturas de madeira, 11., 2008, EBRAMEM, 2008.
- [26] Esteves, B.; Pereira, H., *Novos Métodos de Protecção da Madeira*, Comunicações, 2009.
www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/1707/1/REP-H.Pereira-2.pdf, 20/3/2010
- [27] Finnish Thermowood Association, *Thermowood handbook*, 2003.
www.thermowood.fi/.../795460200312311156_tw_handbook.pdf 24/4/2010
- [28] ROWELL, R. M. et al. *Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat treated and acetylated wood*, European Conference on Wood Modification, 1., 2009, Sweden.
http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2009/fpl_2009_rowell001.pdf, 14/6/2010
- [29] EN 408, Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties, 2003.
- [30] Franco, S., *Proposta de atribuição de propriedades mecânicas a elementos estruturais de madeira por inspecção visual in situ*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [31] Pereira, S., *Avaliação Experimental das Principais Propriedades Mecânicas de Peças Estruturais em Madeira Antiga*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

ANEXOS

A.1

Ficha de classificação visual

FICHA DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL	
LOTE	G
AMOSTRA	5
ESPÉCIE	Carvalho
MASSA VOLÚMICA (AMOSTRA)	593,9 Kg/m ³
ANÁLISE DE DEFEITOS	
Nós	
Face F2: nó alongado com d = 3,5 cm (próximo do meio vão) nó com d = 2,0 cm (próximo mas não agrupado com o anterior) Face F3: nó com d = 2,5 cm (próximo do meio vão) Face F4: nó muito alongado com d = 1,5 cm (meio vão)	
DESCAIO	
Não apresenta descaio (tem um pequeno destacamento na zona de aplicação da carga mas não tem a forma de descaio).	
INCLINAÇÃO FIO	
A inclinação do fio é facilmente observável pela inclinação das fendas. Neste caso pode-se considerar desprezável (fio quase alinhado com o eixo da peça).	
FENDAS	
Face F4: conjunto de fendas agrupadas tapadas com serradura junto ao apoio; Face F6: $L_{f,6} = 57\text{cm} > L/4 = 47,5\text{ cm}$; aparenta ser apenas superficial, $f_6 = 4,5\text{ cm}$ (em 10 cm de altura da secção); Fenda não repassada com $f = 45\% h < 60\%h \rightarrow \text{OK}$	
COMENTÁRIOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Não apresenta sinais visíveis de alterações provocadas por ataque biológico; • Apresenta alguns buracos negros na face F1 (associados aos pregos utilizados na soalha à peça); coloração devida à propagação do fogo nos buracos; • Bom estado geral da viga. 	
QUALIDADE (PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO <i>IN SITU</i>)	
APROVADA	

A.2

Anotações da classificação visual

Viga	Defeitos		Observações	Classificação Atribuída
P1	nós	face 2, 3 nós significativos d=25mm, d=30mm e d=50mm	Apresenta manchas pretas, devido ao incêndio	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	algumas no sentido das fibras, mas não relevantes		
	ataque biológico			
P2	nós		Apresenta manchas amareladas com caruncho associado e ainda alguns vestígios de carbonização, a face 4 apresenta uma facha carbonizada ao longo de todo o comprimento da viga	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face 3 , Lf=12cm; Lf=8cm e Lf=10cm		
	ataque biológico	caruncho		
P3	nós	$20\text{mm} \leq d \leq 45\text{mm}$		Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face 4: Lf=22,5 e f=2cm; Lf=47cm e f=1cm		
	ataque biológico	activo e caruncho		
P4	nós	$60\text{mm} \leq d \leq 100\text{mm}$	Estado geral da peça em muito mau estado. Muitos pontos em que há perda de secção devido a ataque biológico . Face 3 encontra-se fendilhada no sentido das fibras	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face 3: Lf=16cm e Lf=24cm		
	ataque biológico	activo		
P5	nós	$25\text{mm} \leq d \leq 75\text{mm}$	Estado global da peça razoável. Alguns buracos de coloração negra	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face 4: Lf=20cm e f =2cm; Lf=6,5cm e f=1cm		
	ataque biológico	caruncho		

P6	nós	face 1e 2 com $d \leq 30\text{mm}$	Tem alguns buracos de pequena dimensão e profundidade com coloração negra	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		
P7	nós	$50\text{mm} \leq d \leq 70\text{mm}$	Face 1 apresenta 3 buracos algo pronunciados, de cor preta e tem manchas de sobreaquecimento. Face 2 mancha de sobreaquecimento. Face 3 apresenta alguns buracos	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	irregular, tem muitos nós, as fibras tem curvatura		
	fendas	face 2, $L_f = 12\text{cm}$		
	ataque biológico	ataque biológico activo		
P8	nós	$35\text{mm} \leq d \leq 60\text{mm}$		Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		
P9	nós	face 3 $d = 35\text{mm}$, a face 4 tem dois nós muito próximos, cujo $d_{\text{conj}} = 50\text{mm}$	Apresenta nas faces 2 e 3 manchas amarelas. As faces 1, 2 e 3 apresentam ainda alguns buracos devido ao incêndio de coloração negra	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face 2, $L_f = 29,5\text{cm}$		
	ataque biológico	caruncho e ataque biológico activo		
P10	nós	$60\text{mm} \leq d \leq 65\text{mm}$, 2 nós na face 1	Manchas amarelas e alguns vestígios de manchas negras devido ao fogo	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		

P11	nós	15mm≤d≤120mm	Coloração amarela e em algumas partes rosada (possivelmente zonas que sofreram sobreaquecimento), algumas manchas negras	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face 3, Lf=22cm		
	ataque biológico	caruncho		
P12	nós	10mm≤d≤30mm isolados, nós em conjunto:25mm≤d≤50mm	Manchas devido ao facto da madeira ter sofrido incêndio	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face 1, Lf=3,5cm		
	ataque biológico	activo		
P13	nós	10mm≤d≤40mm	Alguns buracos de coloração negra	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face3, Lf=25,7 e f=2,5cm		
	ataque biológico	caruncho		
P14	nós	25mm≤d≤60mm	Aspecto global da viga mau. Alguns buracos negros. A face 1 e 3 encontram-se muito esburacadas	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	activo		
P15	nós	d=60mm	Estado global razoável. Apresenta manchas de coloração amarelada e junto aos nós tem coloração rosada. Tem ainda alguns buracos de coloração preta	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		

P16	nós	20mm≤d≤40mm	Estado geral razoável. Alguns buracos negros e manchas amareladas	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	não significativas, Lf≤16cm		
	ataque biológico	caruncho		
P17	nós	17mm≤d≤30mm	Estado global mau	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	activo e caruncho		
P18	nós		Estado geral da viga mau. Buracos negros	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	Lf=42,5cm e f=1,8cm		
	ataque biológico	caruncho		
P19	nós	11mm≤d≤60mm	Aspecto global razoável. Tem algumas manchas devido ao fogo	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	não significativas Lf=7cm		
	ataque biológico	caruncho		
P20	nós	30mm≤d≤40mm	Aspecto geral da viga bom	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	inactivo e caruncho		

P21	nós	6mm≤d≤120mm	Aspecto global razoável. Tem alguns buracos negros (possível posição de pregos), coloração amarela e rosada	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	praticamente horizontal		
	fendas	face 1 Lf=15cm e f=2,5cm e face4 12cm≤Lf≤36cm		
	ataque biológico	biológico e caruncho		
P22	nós	8mm≤d≤40mm	Aspecto global da viga razoável. Manchas amareladas e rosadas. Zona de apoio a direita a peças encontra-se carbonizada e com alguma perda de secção	Aprovada
	descaio			
	inclinação	na face 1 as fibras apresentam curvatura, nas restantes faces as fibras têm inclinação praticamente horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	inactivo e caruncho		
P23	nós		A peça apresenta-se em muito mau estado. A zona onde se localizam nós, apresenta-se muito esburacada não sendo possível medir o diâmetro dos nós	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	Lf=48cm e f=2cm		
	ataque biológico	activo e caruncho		
P24	nós	20mm≤d≤65mm	Apresenta coloração amarelada e rosada. Aspecto global da peça razoável	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	A face 1 apresenta uma fenda ao longo de todo o comprimento da viga		
	ataque biológico			
P25	nós	30mm≤d≤40mm	Aspecto global da peça razoável. Alguma perda de material devido a ataque biológico. Apresenta buracos negros e pouco profundos	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	inactivo e caruncho		

P26	nós	20mm≤d≤60mm	Aspecto global da viga mau. Apresenta manchas amareladas e negras devido ao incêndio. Na face f4 a 1/2vão apresenta um buraco de coloração negra.	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	fendilhação ao longo da viga de comprimento não significativo		
	ataque biológico			
P27	nós	40mm≤d≤75mm	Aspecto global razoável. Manchas amareladas e manchas pretas devido ao incêndio	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	fendilhação com comprimento pouco significativo		
	ataque biológico	activo e caruncho		
P28	nós		Aspecto global razoável. Manchas amareladas e manchas pretas devido ao incêndio. Alguns buracos	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico			
P29	nós	10mm≤d≤40mm	Aspecto global mau. A face3 esta em muito mau estado, apresenta muitos buracos e alguma fendilhação pouco significativa. A face 2, apresenta alguma perda se secção devido a ataque biológico	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	inactivo e caruncho		
P30	nós	20mm≤d≤65mm	Aspecto global mau. Coloração amarelada e rosada, assim como apresenta manchas negras e ainda presença de algumas partes carbonizadas	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	fendilhação pouco significativa		
	ataque biológico	caruncho		

P31	nós	10mm≤d≤35mm	Alguma coloração amarela e rosada e ainda a madeira apresenta uma coloração de madeira sobreaquecida. Alguns buracos de coloração negra	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		
P32	nós	10mm≤d≤40mm	Aspecto global da peça razoável. Coloração amarelada e rosada em todas as faces	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	fendilhação pouco significativa		
	ataque biológico	inactivo e caruncho		
P33	nós	10mm≤d≤60mm	Aspecto global da peça mau. Presença de muitos nós e defeitos, concentrados na extremidade esquerda. Apresenta manchas resultantes do fogo e ainda coloração rosada e amarelada.	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	inactivo e caruncho		
P34	nós	10mm≤d≤110mm	Muitos nós com ataque biológico, concentrados na extremidade esquerda da face1. Alguns pontos de coloração rosada e amarelada.	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	activo e caruncho		
P35	nós	15mm≤d≤25mm	Vestígios de carvão na face 4. na face 2 algumas manchas rosadas	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		

P36	nós	15mm≤d≤70mm	Apresenta alguns nós com ataque biológico e perda de material associado. Algumas manchas negras devido ao fogo. Coloração amarelada	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face 4 pouco significativas		
	ataque biológico	activo e caruncho		
P37	nós	10mm≤d≤70mm	Coloração amarelada. Alguns buracos de coloração negra. Fendilhação pouco pronunciada	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	activo e caruncho		
P38	nós	10mm≤d≤40mm	Face1 alguma coloração amarela e alguns pontos com notório ataque biológico. Alguns buracos negros. Face 3 apresenta uma facha carboniza e na zona central uma mancha de caruncho	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	inactivo e caruncho		
P39	nós	10mm≤d≤50mm	Aspecto da viga mau. Manchas com coloração amarela e rosada, fendas pouco pronunciadas e de extensão pouco significativa. Presença de alguns buracos negros. Na face 2, junto á zona de carregamento à direita existem 4 nós juntos	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		
P40	nós	25mm≤d≤65mm	Manchas amareladas e rosadas. Algumas manchas negras	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	praticamente horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		

P41	nós	20mm≤d≤100mm	Coloração rosada. Fissuração pouco significativa. Alguns buracos de coloração negra	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico			
P42	nós	d=40mm	Manchas amarelas e rosadas. Na face 1 a extremidade direita encontra-se carbonizada. Buracos negros e com profundidade pouco significativa.	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		
P43	nós	40mm≤d≤75mm	Alguma fendilhação com pouco significado na face 1. a face 4 apresenta alguns buracos com profundidade significativa	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	praticamente horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	activo e caruncho		
P44	nós		Manchas rosadas e amarelas. Manchas negras e apresenta quantidade de buracos significativo	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	na face 3 apresenta uma fenda que acompanha o comprimento da viga		
	ataque biológico			
P45	nós		Coloração amarelada. Face1 facha carbonizada com 36cm de comprimento. Buracos negros de pequena profundidade e algum destacamento de material	Aprovada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	face 4; Lf=27cm		
	ataque biológico	caruncho		

P46	nós	30mm≤d≤70mm	Viga em mau estado. Apresenta buracos nas diferentes faces pouco profundos e de coloração negra. A face 3 apresenta-se fendilhada ao longo do comprimento da viga.	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	caruncho		
P47	nós	10mm≤d≤65mm	perda de material na secção de meio vão devido ao incêndio e a ataque biológico associado. Algumas manchas pretas assim como manchas amareladas e rosadas	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas			
	ataque biológico	activo e caruncho		
P48	nós	60mm≤d≤95mm	Manchas amareladas, rosadas e negras. Na face 2 existe um prego	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	praticamente horizontal		
	fendas	pouco significativa, Lf=4,5cm		
	ataque biológico	caruncho		
P49	nós	30mm≤d≤40mm	Manchas amareladas e pretas	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	fibras apresentam diferentes curvaturas nas diferentes faces		
	fendas			
	ataque biológico	activo		
P50	nós	15mm≤d≤65mm	Alguma fendilhação com pouca importância, excepto na face3. Coloração amarelada e apresenta ainda manchas negras	Rejeitada
	descaio			
	inclinação	horizontal		
	fendas	Lf=39,5 na face 3 na direcção das fibras		
	ataque biológico			

A.3

Anotações das observações após a realização dos ensaios

Viga	Observações após os ensaios	Classificação Atribuída
P1	Abriu por uma fenda já existente, partiu junto ao apoio direito, pouca deformação, carga máxima aproximadamente 8kN	Rejeitada
P2	Carga máxima 11 kN, partiu na zona entre a aplicação da carga e o 1/2 vão, secção esquerda. Na zona de apoio direito houve destacamento de material e de fibras. Deformação a 1/2 vão máxima registada de 41mm	Aprovada
P3	Rompeu pelo nó junto ao ponto de aplicação da carga à esquerda, rotura com ruído. Carga máxima de 6,3kN	Rejeitada
P4	Rompeu pelas fendas já existentes. Viga em muito mau estado. Aguentou pouca carga (1,2kN) e pouca deformação (14,8mm)	Rejeitada
P5	Peça com muitos defeitos observáveis a olho nu. Rompeu junto ao ponto de aplicação da carga devido a fendilhação aí existente com ruído associado. Aguentou pouca carga (3,1kN) e uma deformação de 23mm	Rejeitada
P6	Rotura muito frágil a 1/2 vão por corte sem aviso. Grande ruído aquando da rotura, desmontou o setup de ensaio. Carga máxima atingida foi de 18,3kN e deformação a 1/2vão de 62,8kN	Aprovada
P7	Ensaio anulado, erro no sistema de transmissão de carga	Rejeitada

P8	Ruído aquando da abertura da fenda. Rompe pelo nó, junto ao ponto de aplicação da carga (à direita). Carga máxima 7,2KN e deformação a 1/2vão 26,4mm	Rejeitada
P9	Rompe no ponto de aplicação da carga, devido à existência de um nó na face 3. Com presença de ruído. Carga máxima de 13,6KN e deslocamento de 22,8mm	Rejeitada
P10	Rompe na face 1 junto a um nó do lado esquerdo. A abertura da fenda dá-se com a presença de ruído. Carga máxima de 12,3KN e deslocamento de 21,6mm	Rejeitada
P11	Rompe entre o 1/2 vão e o ponto de aplicação de carga, já apresentava fissuração na face 3. Rotura com aviso, aguentou pouca carga, 2,3KN	Rejeitada
P12	Rotura na face 1 devido a presença de um nó significativo, com ruído associado. Carga máxima suportada de 8KN	Rejeitada
P13	Rotura frágil(?) possivelmente por corte?? Ruído forte associado, carga máxima atingida 8KN	Aprovada
P14	Rompe na face1 devido a presença de nó e com repercussão para a face 3. Pouca carga suportada 3,5KN	Rejeitada
P15	Rompe pelo nó próximo do 1/2vão c ruído associado. Carga máxima suportada de 10,9KN	Rejeitada

P16	Defeito visível junto ao ponto de aplicação da carga à direita. É nesse defeito q a viga rompe com aviso, sendo acompanhada de ruído. Carga máxima de 7,1KN	Aprovada
P17	Rotura a 1/2 vão com ruído, possível presença de defeitos internos, não visíveis exteriormente. Carga máxima atingida 10,6KN	Rejeitada
P18	Rotura a 1/2 vão com aviso rompeu por uma fenda já existente, deslocamento de fibras no apoio direito. Carga máxima verificada 8,7KN	Rejeitada
P19	Rompe por um nó junto ao ponto de aplicação da carga á esquerda, com ruído associado. Na face 4 a 1/2 vão há deslocamento das fibras. Carga máxima atingida 11,5KN	Rejeitada
P20	Rompe no ponto de aplicação da carga á direita devido á existência de nó acompanhada de ruído. Peça não recupera da deformação. Carga máxima 9,1KN e 12,5mm de deformação a 1/2 vão	Aprovada
P21	Rompe a 1/2 vão com ruído associado, possível nó intrínseco. Valor de carga máxima atingido baixa 5,7KN	Rejeitada
P22	Rompe a 1/2 vão, presença de nó com ruído. Carga máxima atingida 6,2KN	Aprovada

P23	Este ensaio foi anulado devido à forte degradação da viga no apoio esquerdo, dado não ser possível apoiar correctamente a viga	Rejeitada
P24	Rotura frágil, rompe no apoio direito onde existe a presença de um nó. Carga máxima registada 7,6KN	Rejeitada
P25	rompe a 1/2vão possível presença de defeito interno, abriu fendas longitudinais na parte inferior da viga e esmagamento na zona do apoio à direita. Boa capacidade de absorção de carga 13,2KN	Aprovada
P26	Rotura com aviso. Destacamento das fibras a 1/2vão. Resistiu a pouca carga, 4,8KN	Aprovada
P27	Rompe a 1/2 vão devido à presença de nós nesse local, verifica-se ainda destacamento de fibras junto ao apoio esquerdo e a 1/2 vão. Carga máxima atingida 8,9KN	Rejeitada
P28	Rotura frágil sem aviso. Rompe junto ao apoio direito com forte ruído. Carga máxima 13,6KN	Aprovada
P29	Rompe a 1/2vão. Rotura com aviso, possível presença de defeito interno. Exteriormente apresentava apenas pequenos buracos. Carga máxima suportada 9,2KN	Aprovada
P30	Rotura frágil, sem aviso. Rompeu numa zona em que havia presença de nós acompanhada de ruído. Carga máxima 10,5KN	Rejeitada

P31	Rompeu junto ao apoio esquerdo na parte inferior da viga. Rotura sem aviso acompanhada de ruído. Carga máxima de 11,5KN	Aprovada
P32	Rompeu junto à zona de aplicação da carga à direita, presença de nó e com ruído. Carga máxima de 11,3KN	Aprovada
P33	Carga máxima atingida baixa, 4,8KN, rompeu junto do apoio esquerdo devido ao nó aí situado. Rotura com aviso	Rejeitada
P34	Bom sustenho de carga 13,8KN. Rotura num nó junto ao apoio esquerdo acompanhada de ruído.	Rejeitada
P35	Rotura muito frágil e sem aviso, acompanhada de forte ruído, rompeu a 1/2vão por corte carga máxima na ordem dos 18KN	Aprovada
P36	Carga máxima de 12,6KN. Rompe com aviso. Começou a romper por uma fenda já existente. Há deslocamento de fibras	Rejeitada
P37	Rotura com aviso. Rompeu no lado direito da viga onde já existia uma pequena fenda. Carga máxima atingida de 7,1KN	Rejeitada
P38	Quando abriu a 1ªfenda ouviu-se ruído. Rompeu aproximadamente a 1/2 vão a fenda abriu na parte inferior da viga. Carga máxima 12,7KN	Aprovada

P39	Carga máxima atingida baixa 4,3KN. Rompeu a 1/2vão num local em que existia buracos resultantes do incêndio	Rejeitada
P40	Rotura frágil no apoio direito presença de nó de grandes dimensões. Carga máxima próxima dos 10KN	Rejeitada
P41	Carga máxima atingida de 12KN. Rotura a 1/2 vão, possível presença de defeitos internos.	Rejeitada
P42	Rotura muito frágil. Rompeu na zona de apoio à esquerda. Carga máxima 9,6KN	Aprovada
P43	Rotura junto ao ponto de aplicação da carga á direita, presença de nó. Rotura com ruído. Rotura frágil. Carga máxima 10,3KN	Rejeitada
P44	Rompeu a 1/2vão com aviso, deslocamento de fibras que acompanham a fenda já existente. Carga máxima suportada 11,2KN	Rejeitada
P45	Rompeu a 1/2vão c, deslocamento de fibras na horizontal, rotura segue uma fenda já existente. Carga máxima suportada 13,1KN	Aprovada

P46	Rompeu num nó situado junto ao apoio direito com ruído associado. Carga máxima atingida de 9KN	Rejeitada
P47	Rompeu junto ao ponto de aplicação da carga à direita, presença de um buraco devido ao incêndio, é por esse ponto que a viga rompeu. Carga máxima 6,4KN	Rejeitada
P48	Rotura junto ao ponto de aplicação da carga à direita com ruído associado junto a um nó. Rotura frágil, carga máxima 11KN	Rejeitada
P49	Rompeu a 1/2vão na parte inferior, presença de nó, ruído e rotura frágil. Carga máxima suportada 4,6KN	Rejeitada
P50	Rotura com aviso. Rompeu a 1/2 vão devido à presença de nó de grandes dimensões. A abertura da 1ªfenda é acompanhada de ruído. Carga máxima atingida baixa, 3,5KN	Rejeitada

Nota: Todos os gráficos, tabelas, fotografias e vídeos relativos a cada amostra encontram-se anexados em suporte digital.

